

# 水曜會誌

## 第25卷 第2号

### 目 次

退職記念講演	
岩盤力学とともに39年 .....	石田 毅 ..... 87
大会記念講演	
燃料電池自動車 MIRAI の開発と水素社会の実現に向けて .....	田中 義和 ..... 101
鉄鋼研究の面白さ：マイクロ組織；マルテンサイト変態；金属疲労 .....	津崎 兼彰 ..... 107
談話室	
観測，理論，そして実験 .....	福山 英一 ..... 113
地球資源に関わる地殻ダイナミクスの理解を目指して： 地球観測データを用いたアプローチ .....	石塚 師也 ..... 118
SiC 単結晶の溶液成長法における溶融合金中の SiC の界面成長 .....	鳴海 大翔 ..... 124
研究速報 .....	132
会 報 .....	161
卒業生名簿 .....	177
会 則 .....	192

令和元年10月31日発行

京 都 大 学

水 曜 会



平成31年度 水曜会大会 記念写真 (令和元年6月1日 京都大学 国際イノベーション棟西館5階 (シンポジウムホール, ホワイエ) にて)



## 退職記念講演

## 岩盤力学とともに39年

石 田 毅\*

## Memories of Rock Mechanics Research for 39 Years

by Tsuyoshi ISHIDA

## 1. はじめに

2019年5月12日に奈良禎太先生をはじめとする皆様のご尽力で退職記念祝賀会を桂キャンパスで開催していただき、身近な同僚や私が在任中に研究室を卒業したみなさんを中心にお集まりいただき祝福していただいた。その際、標記の題目の最終講義を行ったので、以下ではその内容を取りまとめて報告させていただく。

私は1973年に京都大学工学部資源工学科に入学し、1977年に大学院に進学、1980年に大学院博士課程を1年次で中退して、千葉県我孫子市の(財)電力中央研究所(以下では電中研と呼ぶ)に就職した。1991年7月に山口大学工学部に講師として採用され、助教授、教授を経て、2006年6月に京都大学工学研究科に斎藤敏明教授の後任として赴任した。電中研で11年3か月、山口大学で14年11か月、京都大学で12年10か月、計算してみると39年間の勤務を、多少の長短はあるが、ほぼ1/3ずつ異なる3か所の職場で暮らしてきたことになる。幸いにもこの間、一貫して岩盤力学の研究に携わることができた。ここでは、学生時代の思い出から始め、この3か所の職場での研究の思い出を順に述べていきたい。

## 2. 学生時代(1973~1980年)

## 2.1 バスケットボール部の思い出

京都府立嵯峨野高校を卒業後1年間浪人して、1973年4月に京都大学資源工学科に入学した。中学、高校でバスケットボールをしていたので、迷わず体育会のバスケットボール部に入部した。私が入学する2~3年前に百万遍の体育館が竣工したところで、先輩たち

はそれまで屋外のアスファルトのコートで真っ黒に日焼けしながら練習していたとのこと、真新しい体育館で練習できることをたいへん幸せに感じた記憶がある。部員はなぜか圧倒的に土木系の学生が多かったが、1年下には火山学の大家となった理学部の巽好幸君(総合人間学部の教授から海洋研究開発機構に出たのち、現在神戸大学教授)、2年下には唯一の資源工学科の後輩で港先生の研究室に配属された小野直樹君がいたが、彼は現在三菱マテリアルの社長をしている。そのような縁に頼って、彼がまだ副社長だった2017年6月に水曜会大会で講演をしていただいた。私は180cm足らずの身長にもかかわらずチームで2番の長身だったため、193cmの巽君にゴール下でシュートさせるために敵の目を引きつける影武者の役割をしたり、巽君が不在の時には強豪チームの2mを超える選手にマンツーマンでつくことになったりと、身長不足を痛感しながらも楽しく4年間を過ごした。図1は公式戦のスナップ写真である。



図1 1976年6月西日本選手権2回戦 紺のユニホームでジャンプボールに負けているのが私。正面でこちらを向いているのが小野直樹氏

\*京都大学 名誉教授

## 2.2 研究室の思い出と岡行俊先生の突然の逝去

4 回生の研究室配属では、平松良雄教授の研究室に配属になり、岡行俊助教授、松本義男助手、斎藤敏明助手の指導のもとで卒業論文、修士論文を作成した。民間企業で働く自分の姿がどうにもイメージできず、博士課程に進学したいと思ったが、「君は成績が悪いから」と岡先生に何度も断られ、それにもめげず「頑張りますから」と頼み込んでなんとかお許しをいただいた。

博士課程に入学する直前の1979年3月に平松良雄教授が定年退職されたが、その秋岡行俊助教授が突然病気で倒れ逝去された。博士課程1年次に在学していた私は、教授と助教授がいない研究室では博士号はもらえないらしいことを知った。その当時、平松先生、岡先生といっしょに研究しておられた斎藤先生のお気持ちは想像を絶するが、私もどうしたものかとあわてたもののどうしようもなかった。しかしその年の年末、研究室の先輩で電中研におられた日比野敏先生から、電中研に欠員が生じたので応募しないかとの話が斎藤先生を通じてあり、幸運にも1980年4月付で採用された。

## 2.3 幌内炭鉱をはじめとする全国各地での地圧測定

修士論文の研究テーマは、炭鉱における山はねの研究だった。1975年11月に北海道の幌内炭鉱の地下1000mで、坑道を掘進するための発破を行ったところ、通常をはるかに上回る広い範囲に岩石が破碎され、岩石片とともに大量の可燃性ガスが湧出し、そのガスが引火爆発して24人の犠牲者を出した。この事故の原因のひとつは大きな地圧の作用であると推測されたため、事故現場での地圧測定が計画され、これが私の修士の研究テーマとなった。この事故では坑内火災が発生しその消火のため、坑内に犠牲者を残したまま水没させる措置がとられた。私が最初に入坑したのは注水した水を完全に排水した1978年2月初めだったが、「ここで2人、ここで1人、ここで3人倒れていた」と説



図2 幌内炭鉱地下1055mの山はね発生個所の地圧測定現場で撮影(1978)

明を聞きながら坑道を歩き、地下1055mの事故現場に到達した記憶ある。図2はこの測定現場で撮影してもらった写真であり、壁面下部見える2つの丸穴が地圧測定に使用したボーリング孔の孔口である。この現場にM1の冬からD1の冬まで2年間にのべ約3か月間入って地圧測定を行った。現在でも炭鉱で作業をする場合は通常の旅行保険に入れないが、当時先生に「通常の保険には入れないから特別の高い保険をかけてあげたよ」と言われ、大切にされたような危険なところに放り込まれるような、得したような損したような複雑な気持ちになったことを覚えている。現場測定は冬場になることが多く、早朝薄暗いうちに零下20℃を下回る寒さの中を宿舎から鉱山事務所まで歩いてゆき、帰りは坑内の残業で遅くなり日の暮れた道を歩いて帰る太陽の光を見ない日が続くと、「これが私の20歳台前半の青春か」と嘆きなくなった。坑内では何かの手違いで我々が入坑していることが連絡されていなかったのかすぐ近くで発破をかけられたこともあり、炭層の自然発火で坑内に有毒な一酸化炭素ガスが発生し入坑できなかったこともあった。しかし、研究室の先輩の熊本大学の菅原勝彦先生に、九州の炭鉱の地圧測定に招いていただく機会もあり、この北海道と九州の炭鉱は、私にとって「地下深部に穴を掘ると地圧で山が動く」という現象を現場で身をもって理解する貴重な経験になり、その後の研究の重要な糧になった。この幌内の測定結果はなかなかうまくまとめることができなかったが、実際に測定をしてから15年後の1995年によく論文としてとりまとめることができた<sup>1)</sup>。この論文のとりまとめには、電中研の先輩で、当時岐阜大学に在職され、その後山口大学に移られた金折裕司先生に、ご自宅に招いていただいて懇切な指導を受けたことが忘れられない。この後も国際学術雑誌への投稿論文は自力で書いて投稿するとRejectされ、金折先生に修正してもらおうと採択されることが続いた。自力で投稿した論文が採択されるようになったのは、ごく最近、ここ10年ほどのことである。私にとって国際学術雑誌に論文を掲載することは、金折先生の指導がなければ超えられなかった高い壁であり、あらためて感謝している。

研究室の地圧測定は幌内炭鉱にとどまらず、全国各地の鉱山や地下発電所、地下深部の鉄道・道路トンネルなどで地下空洞の設計を目的に行っていたが、私が博士課程に進学するころ、岡先生が京大理学部の中田豊先生とともに地震予知のための地圧測定を開始された。それまで博士課程の学生としてこの研究を担当しておられた亀岡美友氏が卒業されるため、私がこれを引き継ぎ、当時理学部の学生であった小笠原宏氏

(現 立命館大学教授) などとともに佐々連鉱山, 明延鉱山, 平木鉱山などにそれぞれ2~3週間にわたって坑内に入り地圧測定を行った。

### 3. 電中研時代 (1980~1991年)

#### 3.1 Distinct Element Method を用いた 斜面安定解析の試み

電力中央研究所では最初, 北原義浩氏が室長の, 主に斜面の安定性評価を担当する研究室に配属された。第2次世界大戦後世界各国で大規模なダムが建設され, いつくかのダムでは大事故が発生していた。特にイタリアのVaiontでは, ダム湖の斜面に地滑りが発生して巨大な量の岩盤が湖に滑り込み, ダム湖の水が氾濫して下流の2600人の方がなくなる大事故が1963年に発生していた。私が電中研に配属された当時, 建設が進められていた九州電力の天山発電所のダム湖の周囲に, ほぼ鉛直方向に亀裂が平行して並ぶ岩盤斜面が現れた。Vaiontのような滑り破壊であればまだしも既存の安定性の評価手法があったが, 鉛直方向に亀裂が発達しダム湖に倒れこむような斜面の破壊の評価手法は見当たらなかった。しかし今になって思えば, それゆえに研究課題になるというのが, 北原室長のまたその上司で戦後の日本の岩盤力学を牽引してこられた林正夫の副所長の考えだった。

そのころちょうど京大から山口大に異動され米国のミネソタ大学に留学されていた水田義明先生から, P. A. Cundallが開発したDistinct Element Method (DEM: 個別要素法) の論文が届き, 私が在学中, 岡先生が研究室で勉強会を始めておられてことを思い出した。私はあまり熱心な参加者ではなかったが, この手法の利用を思い立ち, 斎藤先生からいろいろな情報をいただいて勉強を始めた。論文を読んでプログラムを手作りし, まず図3に示すように, 直方体のブロックを積み上げてそれを倒し, その挙動を理論解析とDEMによる数値解析と比較したところ, まずまずこの数値解析でブロックの転倒挙動を追えることがわかった<sup>2)</sup>。すると電中研の隣の地質研究室にいた金折裕司氏が, 千木良雅弘氏 (現在, 京大防災研教授) がこのような斜面の転倒破壊 (Toppling Failure) を調査しているから, その結果を解析してみればとアイデアをくださった。さっそく千木良氏に相談すると御嶽山の西に, 図4の写真のように, 道路建設に伴って転倒破壊を起こしている斜面があるとのこと。図4の写真a)の丸印の部分をよく見ると写真b)のように転倒破壊が起こっており, さらに近づいてみると写真c)のように岩柱が曲げ破壊を起こしている。そこでこれをDEM解析した結果が図5である。これでは, 現場の

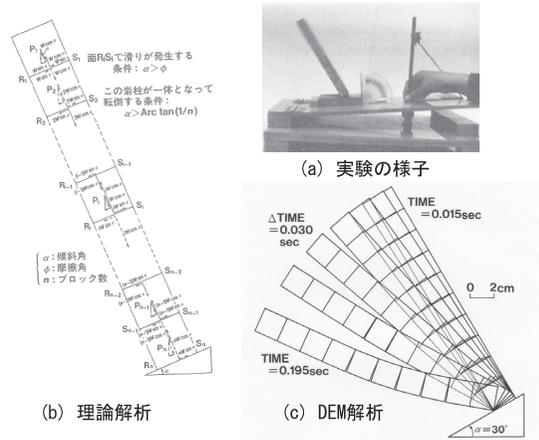


図3 ブロック転倒実験と理論解析, DEM解析の比較<sup>2)</sup>

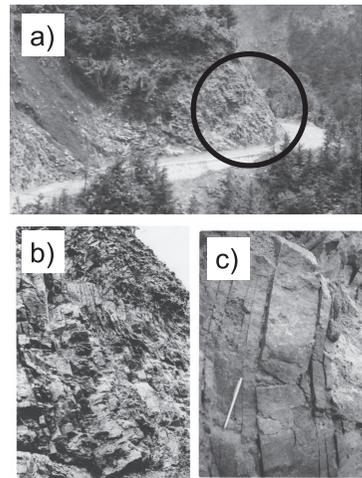


図4 DEM解析の斜面安定への適用<sup>3)</sup>。  
a) 転倒破壊を起こしている斜面の遠景。  
b) a)の丸印の部分の近接写真, 上部で転倒破壊が生じていることがわかる。  
c) 岩柱が曲げ破壊を起こしている。左下はスケール代わりのシャープペンシル。

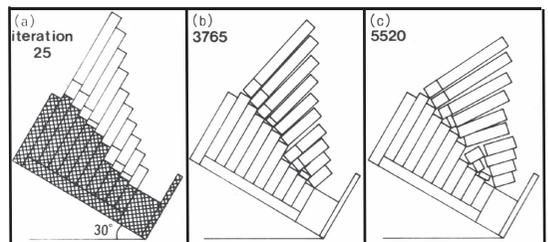


図5 図4の写真の転倒破壊のDEMシミュレーション

斜面の安定性評価の実用にはまだまだほど遠いが、ゆっくりとしたクリープ的な転倒破壊の進展を、数値解析で追うことができたとして論文にまとめ投稿したところ掲載され、私の最初の国際雑誌の掲載論文<sup>3)</sup>となった。私はこの論文投稿をした時点でDEMの研究はやめたが、この手法はさまざまな岩盤挙動を解析できる手法としてその後大きく発展し、この20数年後、私の京大の研究室でも博士課程の清水浩之君がこの手法で岩石の激しい脆性破壊であるCLASS-II挙動<sup>4)</sup>や、破碎流体の粘度による水圧破碎メカニズムの違い<sup>5)</sup>を解析して説明している。

### 3.2 電中研ゲージと京大8素子ゲージを用いた地圧測定

京都大学在学中には岡先生が開発された8素子ゲージを用いて幌内炭鉱を始めとする全国各地で地圧測定を行っていたが、電中研では金川忠氏が電中研式地圧測定ゲージを開発され、電力サイトで多くの測定実績を積んでおられた。当時建設が計画されていた中部電力奥美濃発電所では地下発電所空洞の設計のため、2つの方法で測定を行って結果を比較しようと、京大式と電中研式の2つの方法による地圧測定が計画された。

図6は海拔460m、地表下335mに位置する地圧測定地点の測定ボーリング孔と測定位置である。京大式は2本のボーリング孔で合計5回、電中研式は3本のボーリング孔で合計7回の測定を行い、空洞掘削前の地圧、すなわち初期地圧を測定した。図中にはボーリングコアなどで判定した電中研式岩盤分類による岩盤の分布や電中研式ゲージのゲージ感度から推定した岩盤のヤング率なども示している。測定結果を詳細に分析すると岩盤が硬いほど地圧が大きく、地圧は柔らかい岩盤ではなく硬い岩盤に集中する興味ある傾向がみられたが<sup>6)</sup>、その詳細はここでは省略する。図7は初期地圧の測定結果である。近接した場所で測定しているにもかかわらず、主応力値は大きく異なっているように見えるが、初期地圧の測定精度は今もこの程度であろう。両者の結果を比較すると、京大式で偏差応力が大きく、電中研式では静水圧的な結果が得られているが、これは他の地点での測定においても同様の傾向が得られることが多く、それぞれの測定法の特徴を反映していると思われる。しかし、どちらの方法による結果も、最大圧縮主応力方向が東西方向であることは一致している。図8は、京大式ゲージによる初期地圧

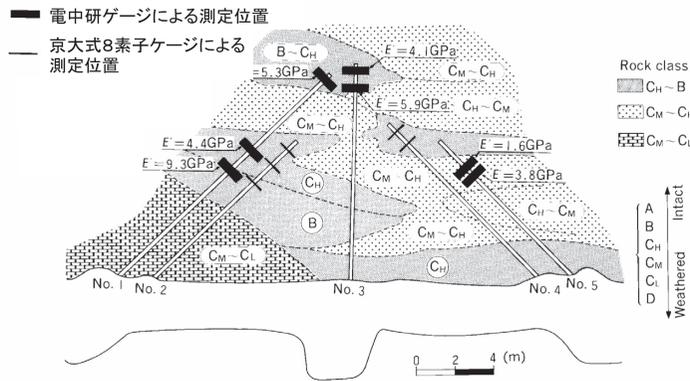


図6 奥美濃地点における京大式8素子ゲージと電中研式ゲージとの測定位置

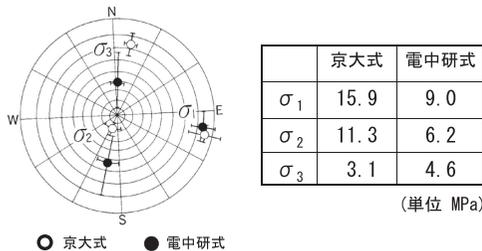


図7 2種類の方法による初期地圧測定結果の比較。主応力方向の下半球ステレオネット投影図(エラーバーは誤差の標準偏差の大きさ)と主応力値(圧縮応力が正)。

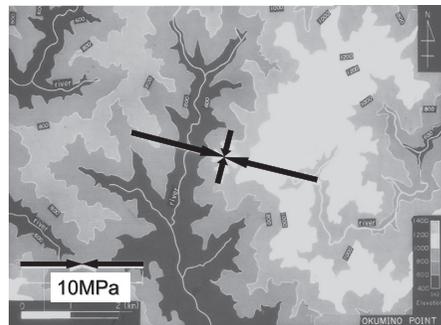


図8 奥美濃地点の地形図上にプロットした、京大式ゲージによる初期地圧測定結果の水平主応力の方向と大きさ

測定結果の水平主応力の方向と大きさを奥美濃地点の地形図上にプロットしたものである。測定地点は川沿いの斜面の地下であるが、斜面に直交する方向に大きな水平応力が作用していることがわかる。一方、京大式ゲージによる測定結果の中間主応力の方向はほぼ鉛直方向で11.3 MPaであり、鉛直方向応力を正確に計算すると10.6 MPaである。これは、岩盤比重2.5と測定深度335 mから推測される鉛直方向応力(かぶり圧)8.4 MPaとほぼ一致する。測定された最大水平応力の大きさ15.9 MPaであり、鉛直方向応力の1.5倍に達する。このような大きな水平応力は、遠方から大きな水平圧が作用していると考えれば理解できる。図9

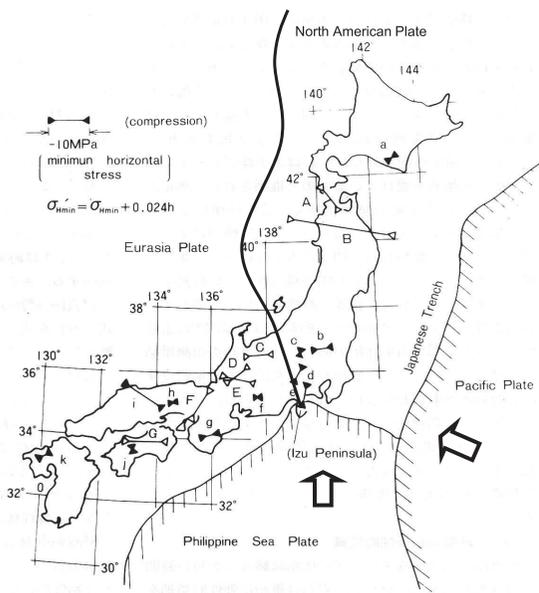


図9 京大式8素子ゲージ(▽印のA,B,C…)と電中研式ゲージ(▼印のa,b,c…)による日本各地における地圧測定結果と日本列島周辺のプレート境界

は、京大式と電中研式で測定した初期地圧の水平方向最大主応力の方向と大きさを日本列島周辺のプレート境界とともに示したものであり、奥美濃地点はE点である。伊豆半島がフィリピン海プレートに乗って100万年前に日本列島に衝突し、現在も南から北に日本列島が押しあげられていることを考えると、伊豆半島付け根の北の南北圧縮傾向は理解しやすい。一方、奥美濃地点を含む中部地方から西日本にかけては、1年に約10 cmの速度で日本列島にぶつかってくる太平洋プレートの影響で東西に圧縮されているとされ、その傾向は活断層や活褶曲などの分析でも指摘されている。これらのことから、奥美濃地点で測定された大きな東西圧縮応力は、太平洋プレートによる水平圧が原因と推測された。一方地下発電所空洞は、図10に示すように、側面に大きな地圧が作用すると破壊しやすいが、空洞の長軸方向に大きな地圧が作用しても破壊しにくい。しかし当初の空洞設計では、図10a)のような最も不安定な状態になっていた。従って、空洞の長軸方向を90°回転することが望ましいことが分かったが、水力発電所であるから上流からの水路(鉄管路)もあれば、下流側の水路(放水路)もあり、発電所軸を回転する場合にはこれらもいっしょに回転する必要がある。しかし、管路が曲がれば水が流れるときにエネルギーロスが生じるため、長期にわたる発電では不利になる。また、空洞の安定性自体も、地圧以外に岩盤内の既存節理の方向を考慮する必要がある。このようなもろもろの要因を総合的に勘案して、当初設計から45°回転して空洞の建設が行われた。

私は在学中に京大式の測定のために奥美濃の現地に赴いていたが、電中研に就職後は金川氏の指導のもと、今度は電中研式の測定のために現地に入ることになった。私にとっては2つの方法に直接携われる素晴らしい

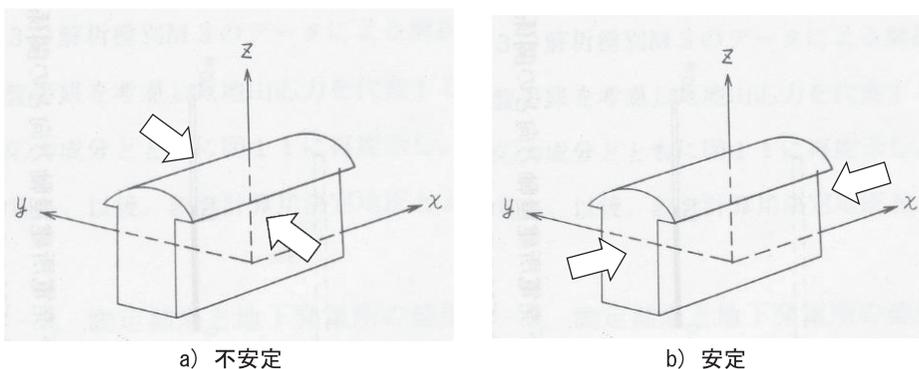


図10 初期地圧と地下発電所空洞の安定性。

- a) 不安定。側面に大きな地圧が作用すると空洞は破壊しやすい。
- b) 安定。空洞の長軸方向に大きな地圧が作用しても空洞は破壊しにくい。

い機会を得たわけであるが、2つの測定法はそれぞれの開発者が苦勞しながら自信をもって開発したものであり、時には結果が一致しないこともあり、互いに自分の方が正しいとライバル心もある。私は「自分が携わっていた京大式が正しく電中研式は怪しい」と自然に信じていたようで、電中研でご指導いただいた金川氏には、ずいぶん失礼なことを言いご迷惑をおかけしたようである。結論は、どちらが正しいということではなく、地圧という難しい量の測定に対し、いずれの方法にもメリットとデメリットがあり、測定結果に測定法の特徴が反映されるということであるが、そのことが腑に落ちるまでには長い時間を必要とした。金川氏やその後室長としてご指導いただいた日比野敏氏のご厚意もあり、京大と電中研の両方で測定したデータを利用していただいて<sup>7)8)</sup>、1989年3月に寺田学先生のご指導のもとで「岩盤内の初期地圧状態に関する研究」の題目で京都大学から博士号をいただくことができた。

### 3.3 地下発電所空洞掘削に伴う

#### Acoustic Emission の測定

一方私が電中研に採用された1980年ごろ、東京電力今市発電所の地下発電所空洞をかなり掘り下げた後に、空洞上部の肩部の岩盤に亀裂が生じるという事故が発生した。このような亀裂の発生をAE (Acoustic Emission) で事前に把握する研究をしてはどうかとの提案が、副所長の林正夫氏からなされた。金川氏の指導を得て、まずは現場でAEの測定を試みようということになり、東京電力の協力を得て葛野川発電所の下ダムの調査横坑で岩盤強度の測定のため実施される原位置岩盤せん断試験の際にAEを測定することになった。現場でAEを測定するといっても、測定器もなければ解析の方法もよくわからない。そこで高温岩体の地熱開発に関連して水圧破碎のAE観測に経験のある耐震研究室の澤田義博氏(名古屋大学教授、現在地震予知総合研究振興会専務理事)や佐々木俊二氏(現在地震予知総合研究振興会)にお願いして、測定器をお借りし、またAEの震源決定法も一から教えていただいた。さらに水圧破碎のAE測定の研究にも加えていただき、波動論をはじめとするさまざまな地震学の基礎知識をお教えた。このご指導がなければ、その後のAEの研究はできなかつたと感謝している。

1984年に岩盤せん断試験のAE測定を行い<sup>9)10)</sup>、現場でAEが測定できることは分かったものの、電力需要が伸びず、なかなか次の地下発電所の建設が始まらない。その間、清水建設技研の木下直人氏たちのグループのお力を借り、岩石の加熱時の破壊挙動をAEで測定<sup>11-13)</sup>していると、組織改編で研究所内に原燃サイ



図11 関西電力(株)大河内発電所の地下発電所空洞(関西電力のパンフレットより引用)

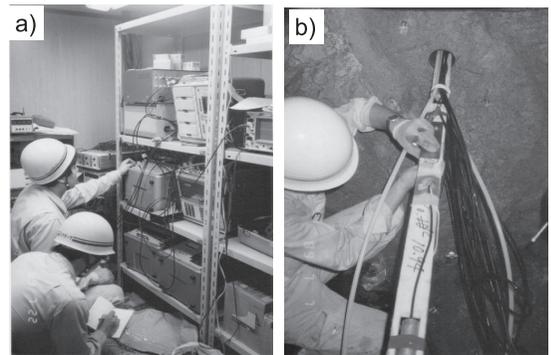


図12 地下発電所掘削時の周辺岩盤でのAE測定  
a) 地下発電所の周辺トンネル内に設けた測定室での作業風景  
b) AEセンサーとプリ・アンプのボーリング孔への挿入作業

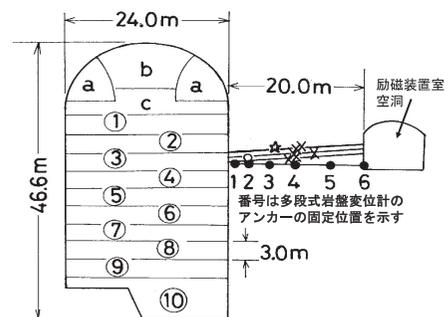


図13 大河内地下発電所の掘削ステップとAEセンサー埋設孔の位置、岩盤変位計のアンカー位置を示す。☆、○、×印は震源決定されたAEの発生位置を示す。

クル部処分研究室というのができ、そこに配属され、高レベル放射性廃棄物の地層処分研究に専念しろということになった。しかし、1989年ごろから東京電力塩原、関西電力大河内、中部電力奥美濃の3か所で揚水発電所の建設がほぼ同時に始まり、それぞれの地下発電所空洞掘削時のAEが測定実現した。ここでは図11に示す関西電力(株)大河内発電所での測定結果<sup>14)15)</sup>を簡単に紹介する。

AE測定を行った位置は、図11の上部の空洞の右側の壁面の岩盤中である。図12に現地での測定の様子を示す。この空洞は地表下約280mに位置し、図13に示すように幅24.0m、高さ46.6mの弾頭形の断面であった。空洞上部をa,b,cの順に掘削した後、空洞下部を3m高さのベンチに区分し、①ベンチから⑩ベンチまで順に掘り下げて空洞掘削を進めた。AEセンサー埋設のため、先に掘削されていた励磁装置室空洞から本体空洞中央の側壁部に向けて3本のボーリング孔を掘削し、各孔に8個ずつ、合計で24個のAEセンサーを設置した。測定対象としたAEの周波数帯域は、15~40kHzである。図14は、埋設されたAEセンサーの位置を3次元的に示したものである。このように3次元的に配置したセンサーに囲まれた領域でAEが発生し、P波初動の明瞭な波形が多数のセンサーで観測されれば、AEの発生位置やAEの発生原因となった破壊面の走向・傾斜、破壊に際して作用した主応力の方向を明らかにすることができる。他の地下発電所空洞と同様、この地点でもAEの発生自体は多数観測されたが、大多数は1個もしくは2個のセンサーだけで受振される小さなAEで、AEの発生位置や発生原因を解析できる規模の大きなAEは、図中に☆印で示した空洞上部の切抜掘削時の1個、○印で示した3ベンチ掘削時の1個、×印で示した6ベンチ掘削時の6個の合計8個だけであった。しかしこれらのAE解析結果は、岩盤内の卓越節理の方向、岩盤変位計や地圧測

定結果などと合理的に一致することがわかった。

この測定では、微小な破壊を観測の対象としていたので、1個のセンサーでカバーできる監視領域の広さが半径1~2mの範囲と狭い。このため、広い範囲を対象とする場合や、破壊メカニズムの解析を目的とした3次元的なAE測定を行う場合には費用がかさむ問題がある。この一連の測定では総額1億円以上の予算が費やされたと思われるが、解析できたAEは合計8個であり、1個当たり1,000万円以上かかった計算になる。この点は今後改良の必要があるが、この研究により、AE測定を行えば空洞の破壊に関する有用な情報が得られることを明らかにすることができた。このうちAEを測定してAE発生個所にロックボルトを増し打ちすると岩盤のはらみだし変形を止めることができることがわかり実務的な利用がなされていると聞いている。また東京電力葛野川発電所や神流川発電所で規模を拡大して実施され、測定データを用いた優れた研究論文も発表されている<sup>16)</sup>。もし私が実務に役立つ技術を社会に残せたとすると、このAE測定技術かもしれないと心ひそかに自負している。

#### 4. 山口大学時代 (1991年~2006年)

##### 4.1 米国への2回の留学と念願の国際化の実現

研究室の先輩でもある水田先生から声をかけていただき、1991年7月に山口大学工学部社会建設工学科の水田義明教授、佐野修助教授の研究室に講師として採用された。

かねて海外留学を希望していたが、水田先生にお願いして1993年3月から1年間、家族を帯同して米国ミネソタ大学に留学させていただいた。水田先生の友人であるS. L. Crouch先生やC. Fairhurst先生に親切にさせていただいた。身柄引受人になってくださったCrouch先生のアレンジで私と同年配のJ. F. Labuz先生と共同研究を行う機会を得<sup>17)</sup>、またE. Detourney

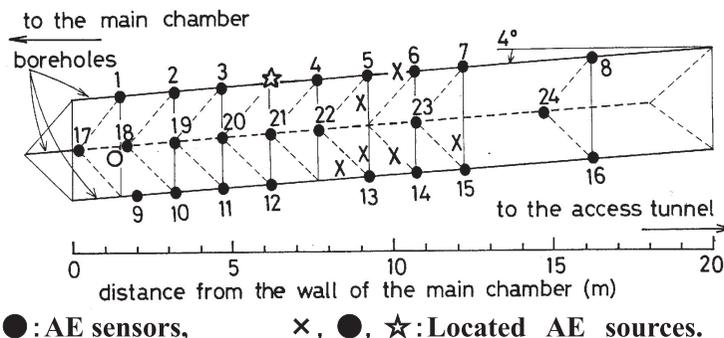


図14 AEセンサーの配置と震源決定されたAEの発生位置の3次元鳥観図。  
AEセンサーは3本のボーリング孔に1.5m間隔で8個ずつ合計24個設置した。

先生とも親しくなった。この1年の留学で、留学しても英語は簡単には上達しないことを痛感したが、それでもかなり意思の疎通ができるようになった。Labuz先生とはさまざまな情報交換や共同作業<sup>18)</sup>をしながら招聘したりされたりの交流が続いている。昨年夏にはLabuz先生のご夫妻のご厚意に甘え、私の長男家族、長女家族もいっしょにご自宅にお邪魔し、先方の長男夫妻も加わって夕食を共にして昔を懐かしんだ。

ミネソタ大学から帰ってから3年後、今度は米国オクラホマ大学に留学の機会を得た。水田先生の紹介でオクラホマ大学の研究所 Rock Mechanics Institute 所長の J.C. Roegiers 先生のもとで、北海道大学から留学していた藤井義明先生といっしょに1997年11月から3か月間油・ガス田の開発に関する岩盤力学を学んだ。この研究所ではコンソーシアムという組織をつくって石油各社から寄付金を集めて研究をしていた。コンソーシアムを用いた産学連携はアメリカ、カナダでは盛んに行われているが、我国ではまだあまり盛んではないようである。

山口大学の研究室には外国の研究者が来学することが多く、留学の機会を含め、私の交流も急速に海外に広がっていき、水田先生のおかげで念願の国際化はかかることができた。

#### 4.2 水圧破碎 AE 測定実験の開始と

##### 「岩盤破壊音の科学」の上梓

ミネソタ大学から帰国後、地熱開発を目的として、花崗岩供試体を水圧で破碎して AE を測定する研究を始めた。電中研では組織の縦割り地熱開発に関連した研究を私は主担当として行うことができなかった。しかし、山口大学ではそのような制約はなく、しかも

水田先生が使っておられた実験機器があり、また学内の予算を手当して新たな AE 測定装置を設置していただき、これに科研費を加えて研究をのびのびと進めることができた<sup>19)</sup>。自分たちで実験をするだけではなく、電中研の佐々木俊二氏や産総研の松永烈氏から実験データをいただいで論文にまとめたり<sup>20)</sup>、さまざまな研究情報をいただいたりして温かいご支援を得た。この成果が京大で展開した CO<sub>2</sub> (二酸化炭素) による水圧破碎実験や現在の JOGMEC (石油天然ガス・金属鉱物資源機構) とのシェールガス開発を目的にした共同研究に結びついている。

またこれまでの AE 測定に関する研究を、図15の「岩盤破壊音の科学」という著書<sup>21)</sup>にまとめ出版することができた。

#### 4.3 博士論文の指導

私が山口大学に赴任したころ、山口大学では新たに大学院の博士課程を設置していたが、博士課程に入学する人が少なく、教員は入学者を勧誘するよう強く要請された。私もその圧力に背中を押されて社会人の方に声をかけたが、全国と同じ規模の国立大学はほぼ一斉に同じ状況にあり、博士号を取れそうな優秀な社会人は取り合いになっていた。しかし何とか何人かに入学していただくことができた。留学生の方を含め私のもとで博士号を取得された方を学位授与の時期とともに次に示す。1997年3月陳渠博士、1998年5月木下直人博士、2002年3月横山幸也博士、2003年3月中山芳樹博士、2003年3月宇野晴彦博士、2007年3月田仲正弘博士、2007年3月李剛博士。最後の李剛氏は、その年の世界で最も優れた岩盤力学の博士論文に送られる ISRM (International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering) Rocha Medal を受賞された。この賞を日本の大学の博士論文で受賞したのは彼が初めてである。なお、この博士論文の指導とこの賞への推薦は水田先生がなされたものであり、私は水田先生の定年退職後少しお手伝いしただけであることを付記しておく。

#### 4.4 岩盤斜面崩落予測のための AE 測定

山口大学ではなかなか現場測定の間機を得ることができなかったが、1999年8月27日山口市鳴滝の花崗岩採石場の跡地で崩壊土量 3300 m<sup>3</sup> の岩盤崩落が発生し、崩壊した岩石が斜面下部の県道を 28m にわたって閉塞する事故が発生した。そして崩落後の斜面に、図16の写真に丸印で示した不安定岩塊が残り、復旧工事の安全確保のためにこの岩塊の監視が必要となった。この大崩落の崩落の6日前の早朝、犬の散歩をしていた人が異常な音を聞き警察に通報、直径 0.7 m 程度の岩塊の落下跡が確認されたため、道路が通行止め

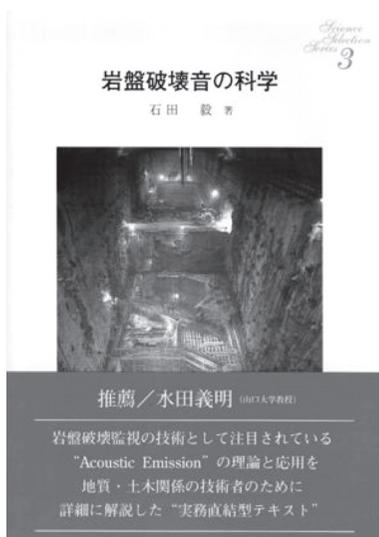


図 15 「岩盤破壊音の科学」(近未来社)の表紙

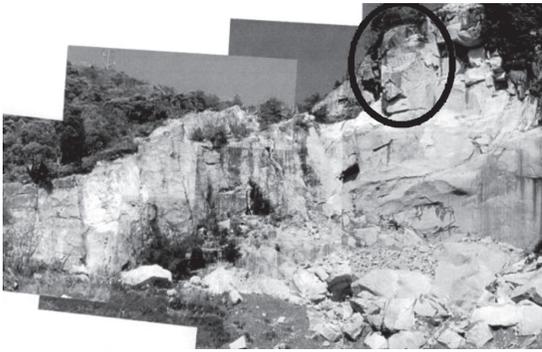


図16 山口市鳴滝の花崗岩の採石場跡の岩盤崩落現場。丸印が復旧工事に際して監視が必要となった不安定岩塊。

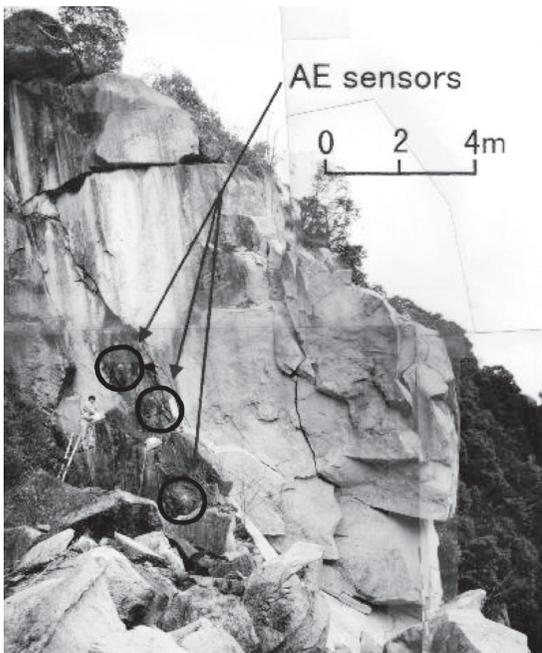


図17 側面から見た不安定岩塊。3個のAEセンサーは崩壊時にすべり面になると予想された開口亀裂の直下に設置した。

にされていた。このため、幸いにも大崩落による人災はなかった。大崩落崩落の前日、この小崩落の範囲を把握するため測量隊が山に入っていたが、岩盤から不気味な音が聞こえたため、作業を早めにやめて退避していた。このことからこの現場ではAE測定が有効と思われた。たまたま幸運にもこの現場の管理を請け負ったコンサルタント、東建ジオテックの北村晴夫氏、西川直志氏が上梓したばかりの「岩盤破壊音の科学」を読んでくださっており、私のところに協力の要請が来た。

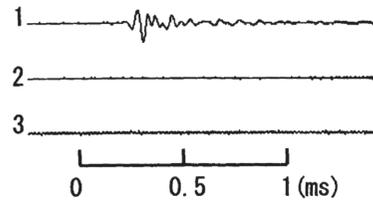


図18 測定波形の一例。このように大半のAEは1個のセンサーでのみ観測された。

図17に側面から見た不安定岩塊を示す。○で囲んで示したように、崩壊時にすべり面になると予想された開口亀裂の直下に、固有周波数30kHzのAEセンサーを3個設置した。岩塊の大きさは高さ20m、厚さ7m、幅（紙面に垂直方向）10mである。写真中央左側の脚立の上の方の身長と比較すると岩塊の大きさが実感できる。図18に示した測定波形の例のように、AEはひとつのセンサーだけで測定されることが多かった。この事実は、AEが小さくその波動が2~3mしか伝播しないことを意味している。雨が降ると雨滴が岩盤をたたく音がノイズとなり、また風が吹いて何かがセンサーの近くに落ちてきてもノイズとなる。この後ボーリング孔を掘削して孔内にセンサーを設置してこのようなノイズの除去を試みるとともに、レーザ変位計による岩塊の変位の測定も行い、AEデータとの比較を行いながら岩塊の挙動を監視した<sup>22)23)</sup>。結局、岩塊は崩落することなく発破で除去され復旧工事は無事完了した。この経験から、岩盤斜面の監視は次の理由で難しいと感じた。(1)不安定岩塊の形態が、ひとつひとつ現場によって異なる。(2)従って、適する観測方法が斜面ごとに異なる。(3)すなわち、オーダーメイドの観測手法が斜面ごとに必要になるため、測定経験の蓄積による手法の改良が難しい。

## 5. 京都大学時代 (2006年~2019年)

### 5.1 京大着任とCO<sub>2</sub>を用いた水圧破碎研究の開始

2006年6月に京都大学に着任した。山口大学では水田先生が定年退職されたのち教授に昇進したものの、水圧破碎を用いる高温岩体地熱発電は政策の変更で下火となり、土木の世界も新設工事からメンテナンスへと必要とされる研究課題が変わり、何を対象とすべきか研究課題の選択に悩んでいた。そのような状況の中で、地球温暖化の原因とされるCO<sub>2</sub>を地中に隔離するCCS (Carbon Capture and Storage)に興味をもち少し調査をはじめていた。京都は、気候変動に関する国際連合枠組条約が議定書として取りまとめられた土地でもあり、CCSの研究をするには好適な土地ではな

いかとも感じられた。そのうち、CO<sub>2</sub>を単に地中に隔離するだけでなく地下エネルギー資源の生産にも利用するCCUS (Carbon Capture Utilization and Storage) という概念があり、また北米で盛んになってきたシェールガスの開発や地熱の開発に従来の水でなくCO<sub>2</sub>で水圧破碎することが提案されていることを知った。そこで、山口大学で水や粘度の大きな油を破碎流体に用いて行っていた水圧破碎実験<sup>19)</sup>を、CO<sub>2</sub>を用いてやってみることを着想し、科研の基盤研究Bに応募したところ幸運にも採択された。

## 5.2 室内実験によるCO<sub>2</sub>を用いた水圧破碎研究

CO<sub>2</sub>は温度31.1℃以上、圧力7.38MPa以上の高温高压状態になると超臨界という液体と気体の中間状態になり、液体の水に比べて比重0.5、粘度0.01~0.1の軽くてさらさらした状態になる。シェールガスの開発や地熱の開発は地下3~4kmの高温高压状態で行われることが多いため、このような地下深部の岩盤をCO<sub>2</sub>で破碎する場合、CO<sub>2</sub>は超臨界(SC: Super Critical)状態になる。これを室内実験で実現するには、新たな設備を構築する必要があった。安全面も考慮すると、学内で実施するには難しい点もあり、山口大学でいっしょに水圧破碎実験をした中山芳樹氏、陳渠氏がおられ、水田義明先生が社長をしておられる3D地科学研究所にこの業務をお願いすることにした。

図19に示す一辺170mmの立方体の花崗岩を用い、供試体の中央に直径20mmの水圧破碎孔を穿ち、破碎孔の中央部の60mm区間を密閉して、SC-CO<sub>2</sub>(超臨界CO<sub>2</sub>)、L-CO<sub>2</sub>(液体CO<sub>2</sub>)、水及び粘度の大きな自動車のトランミッションオイルの4種類の破碎流体を用いて水圧破碎し、破碎に伴うAEを測定した。また造成した亀裂を陳友晴先生に蛍光法で観察していただき、AE測定の結果と比較した。図20にSC-CO<sub>2</sub>圧入のための圧力温度制御システムを、図21にSC-CO<sub>2</sub>による水圧破碎の室内実験風景を示す。実験結果の一例として、図22にSC-CO<sub>2</sub>による破碎時の流体圧、拘束圧、温度、AE発生率の経時変化を、図23にこのとき得られたAE震源分布と供試体表面で確認された亀裂を示す。

失敗を繰り返す苦勞の多い実験であったが、4年間の実験結果を整理すると「SC-CO<sub>2</sub>は水に比べてシェールガスの生産や地熱抽出に有利な3次元的な亀裂を広い範囲に造成できる」との結論を得た<sup>24)25)</sup>。この成果をとりあえずアメリカの地球物理学会のレター誌に出したところ<sup>24)</sup>、CO<sub>2</sub>の有効利用で面白いと思われたようで、英国の科学雑誌New Scientists Magazineがこの論文をホームページで「CO<sub>2</sub>フラクチャリングはシェールガスの採取に有利で、かつCCSも同時に可

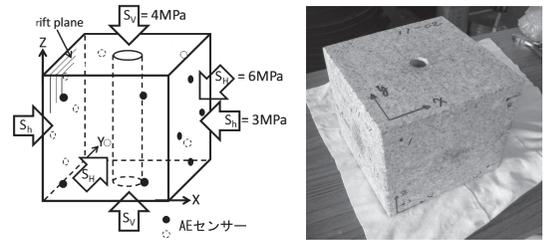


図19 荷重条件、AEセンサーの位置と供試体の写真

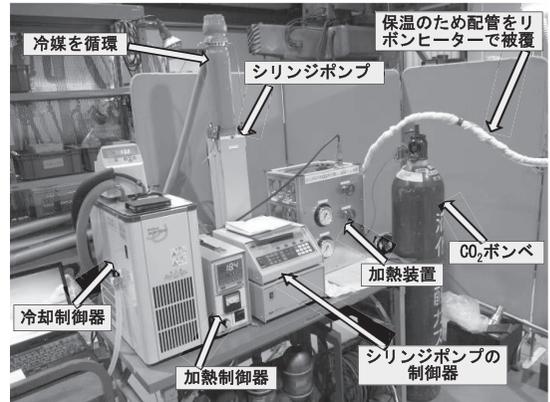


図20 SC-CO<sub>2</sub>圧入のための圧力温度制御システム



図21 SC-CO<sub>2</sub>による水圧破碎の室内実験風景

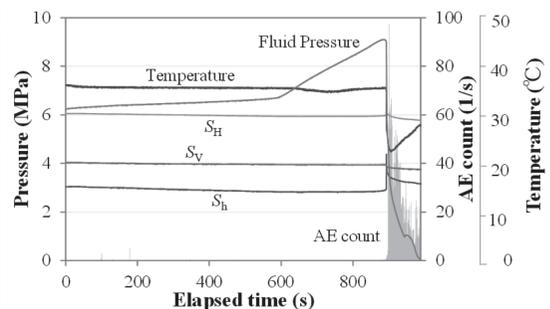


図22 SC-CO<sub>2</sub>による破碎時の流体圧、拘束圧、温度、AE発生率の経時変化

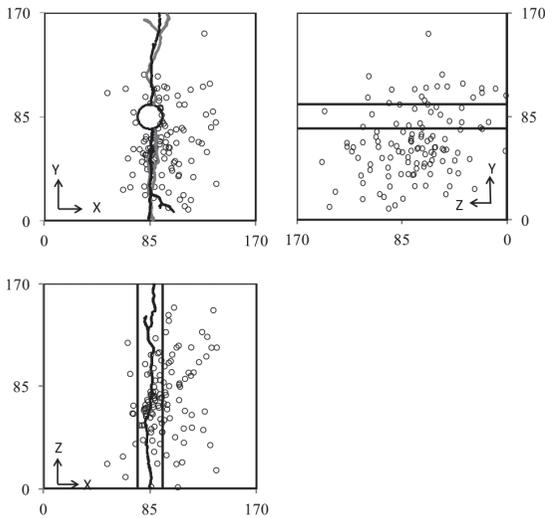


図23 SC-CO<sub>2</sub>による破砕で得られたAE震源の水平面XY面と鉛直面XZ面、YZ面への投影図及び供試体表面で確認された亀裂

能」と紹介してくれた。また、しばらくして米国の科学雑誌 MIT Technology Review も、「水のない砂漠地帯で随伴ガスとしてCO<sub>2</sub>が出てくる油田の近くにあるシェールガスの開発には、CO<sub>2</sub>での水圧破砕は特に利用価値が高い」と紹介してくれた。国内でも宣伝しようとする研究成果をプレスシートにまとめ京大記者室に投げ込んだところ、京都新聞は翌日、半年ほどしてからではあったが、読売新聞も2014年4月15日付の夕刊第1面に記事を掲載してくれ、また翌朝には読売新聞の英字紙 Japan News の第1面にも掲載され大いに元気が出た。

5.3 現場実験によるCO<sub>2</sub>を用いた水圧破砕研究

室内実験ではある程度の成果は得られたが、現場での実用に供するために必要な次のような課題が残っていた。1)室内実験では水圧破砕亀裂がすぐに供試体の端面まで進展してしまうため、CO<sub>2</sub>と水によるき裂の広がりや大きさの違いがわからない。2)現実の地下岩盤で頻繁に遭遇する天然のき裂の影響がわからない。

小規模でもよいのでCO<sub>2</sub>と水で現地の水圧破砕ができれば、上記2点の課題を解決できるとともに、室内実験と現場のスケールの違いを少しでも埋めることができる。そこで、室内実験の次の4年間には現場実験を計画し、科研の基盤研究Aに応募したところ採択された。また室内実験と現場実験の間にどうしても研究資金が不足する時期が生じたが、そのときはちょうど運よく、公益信託ENEOS水素基金の支援を得ることができた。

室内実験と同じようにSC-CO<sub>2</sub>で岩盤を水圧破砕するためには、臨界点(31.1℃、圧力7.38MPa)以上の高温高压状態で岩盤を破砕する必要がある。中部山岳地帯の花崗岩中の坑道にそのような場所があることを知り、多くの方にお世話になって現地実験を実現できた。図24にこの現場水圧破砕実験の破砕孔とAEセンサーの配置を、図25に現場の実験風景を示す。またSC-CO<sub>2</sub>と比較のため、L-CO<sub>2</sub>で水圧破砕することを計画した。臨界温度31.1℃以下の岩盤で同様の実験を行えば、L-CO<sub>2</sub>での水圧破砕実験が行えるため、日本原子力研究開発機構をお願いをして、瑞浪超深地層研究所施設の深度500mの研究坑道をお借りした。ここではCO<sub>2</sub>の密閉がうまくいかずL-CO<sub>2</sub>で水圧破砕は失敗したが、水での水圧破砕には成功し、水圧破砕の新規亀裂の造成は引張型破壊で生じることなど、破砕メカニズムについて新たな知見を得ることができた<sup>26)</sup>。これらの現場実験には、新たに研究室の助教に着任された直井誠先生に参加いただき、AE測定法と解析法を大きく改善していただいた。

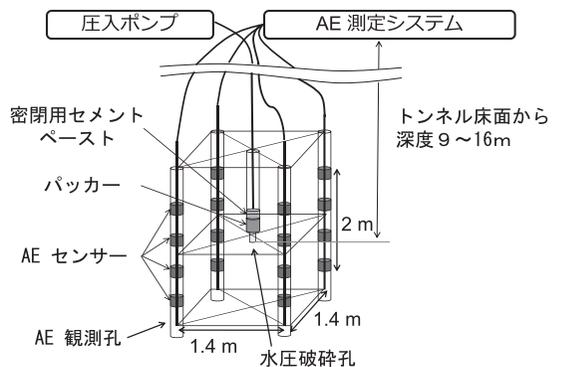


図24 SC-CO<sub>2</sub>による現場水圧破砕実験における破砕孔とAEセンサーの配置



図25 SC-CO<sub>2</sub>による水圧破砕実験の現場風景

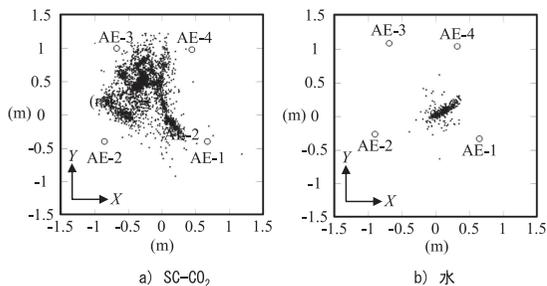


図26 SC-CO<sub>2</sub>と水による現場水圧破碎実験で得られたAE震源分布の水平面投影図

高温岩盤でのSC-CO<sub>2</sub>と水のよる水圧破碎実験結果の一例を図26に示す。CO<sub>2</sub>と水は10mL/minの同じ流量で圧入したが、この図からわかるように、(1)SC-CO<sub>2</sub>では水に比べて広い範囲にAEが発生すること、すなわち大きな亀裂が生じる傾向がある。これ以外に、(2)CO<sub>2</sub>の場合も水の場合も新規亀裂は引張型破壊で生じる傾向があること、(3)新規亀裂造成後は、水の場合はせん断型AEしか生じないが、CO<sub>2</sub>の場合はせん断型のAEとともに亀裂閉合型のAEが多数測定され、これはCO<sub>2</sub>のガス抜けによる亀裂閉塞によるものと推測されること、(4)CO<sub>2</sub>は容易に既存亀裂に侵入し、せん断型破壊と亀裂閉合型のAEを多数発生するが、少なくとも亀裂閉合型のAEは新たな亀裂を造成するとは考えられないので、誘発地震や自然地震を誘発する可能性は低いと思われることなどが明らかになった。これらについては、定年退職までに作業が間に合わず、現在論文を執筆中である。

#### 5.4 JOGMEC との共同研究，博士論文の指導，

##### 「岩盤応力とその測定」の上梓など

京都大学に赴任後、研究室の卒業生が石油業界に就職することが多く、JOGMEC（石油天然ガス・金属鉱物資源機構）からの申し出を受けて共同研究を続けてきた。当初は水攻法（石油が出なくなった油田に水を圧入して生産性を回復させる方法）に伴う微小地震やボアホール・ブレイクアウト（地圧による生産井の崩壊）に関する実験的研究を行っていたが、ここ数年はシェールガス開発に向けた水圧破碎の研究にシフトしている。上に述べたCO<sub>2</sub>を用いた水圧破碎実験は、室内実験も現場実験も花崗岩を対象としている。これをシェールで、しかも破碎流体に蛍光樹脂を入れた樹脂で破碎してAE測定と亀裂に充填された蛍光樹脂の観察で水圧破碎亀裂を可視化することに注力している。室内実験は直井誠、陳友晴の両先生に任せ、私は現場実験の企画を退職後のいまもお手伝いしている。

京都大学では、3人の博士課程の学生を指導した。

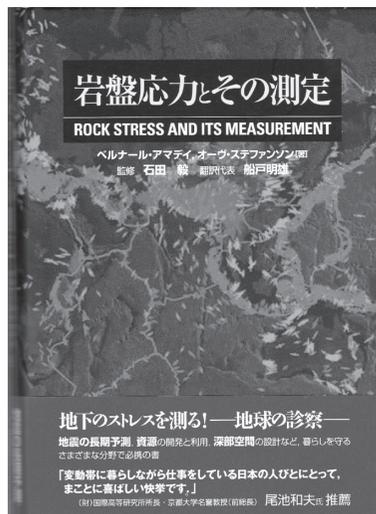


図27 「岩盤応力とその測定」(京都大学学術出版会)の表紙

2009年3月清水浩之博士、2017年3月青柳和平博士、2017年3月Ziad Bennour博士である。これらの3人は、修士課程修了後進学、修士を終了して就職後社会人ドクターとして入学、リビアからの国費留学生として来日し修士課程を修了後博士課程に進学という経緯で、それぞれ個性的で思い出深い。

図27に示した「Amadei & Stephansson 著, Rock Stress and Its Measurement」を翻訳した「岩盤応力とその測定」の上梓も在職中の大きな思い出のひとつである。「応用地質(株)の船戸明雄氏が半ばまで自力で翻訳しているのだが、後の半分の翻訳を完成して出版できないだろうか」と、深田地質研究所理事長の田中莊一氏に声をかけていただいたのが端緒である。横山幸也氏に副委員長、船戸明雄、伊藤高敏、高橋亨の3氏に幹事をお願いし、深田地質研究所に総勢13名の委員会を設置して作業を進めた。当時研究室の准教授の村田彦彦先生、助教の深堀大介先生にお願いをして研究室のゼミでこの本の輪読をして研究室の学生さんに、また地圧測定を課題にしていた私の大学院の講義のレポートとして受講生にこの本の翻訳原稿を出してもらい、それを委員会で校閲するかたちで、不足分の翻訳原稿を作成した。原著の筆頭著者のAmadei先生は翻訳書の出版に興味がなく協力的でなかったが、Stephansson先生はそれまでのおつき合いもあったので、非常に協力的で、「日本語版刊行によせて」に温かい文章をお送りくださり、また深田研で2012年9月24日に開催した出版記念講演会にも参加して下さった。Stephansson先生は、スウェーデン王立工科大学

を定年退職後、ドイツ、ポツダムの研究所 GFZ に名誉教授のようなお立場でおられる。現在81歳であるが、昨年 GFZ を訪問した折には研究所に出てきてくださり、翌日ベルリンのご自宅にお招きいただいた。本著の翻訳のご縁で今も親切にしてくださっている。

## 6. ま と め

このように過去の記憶を手繰っていくと、いかに多くの先輩、同輩、後輩に支えられてきたかを改めて痛感する。大変お世話になりながら、本稿でお名前を挙げられなかった方も多い。一方、岡先生がなくなったあと、平松先生の研究室の卒業生で研究職についている先輩方が、「平松、岡先生を囲む研究懇談会」をつくれ、私もその末席に加えていただいた。2009年1月平松先生が亡くなり、卒業生の諸先輩に声をかけて「平松先生を偲ぶ会」を開催したが、図28の写真は、その前夜に集まったメンバーである。この会の後、棚橋先生、木山先生が亡くなり、これが全員の顔がそろった最後の会になってしまった。私自身は、前列右端の斎藤先生から前列中央の日比野先生に、次に日比野先生からその右の水田先生に、最後に斎藤先生に託されて、一生を終えたともいえる。前列左端の菅原先生には私が4回生のときの卒論を遠く熊本からご指導いただき、また京大着任後に私が最初に採用した助教はこの先生の最後の教え子の深堀大介氏であった。このように手厚くご指導、ご支援いただけたのは、大変幸せなことであったと、特にこのメンバーの方々には深く感謝をしている。

外国へ出ると、60歳台後半はもとより、70歳台の研



図28 平松、岡先生を囲む研究懇談会メンバー。  
後列左から亀岡美友(施工総研)、棚橋由彦(長崎大)、木山英郎(鳥取大)、厨川道雄(産総研)、石田毅  
前列左から菅原勝彦(熊本大)、日比野敏(電中研)、水田義明(山口大)、斎藤敏明(京大)。  
平松先生を偲ぶ会 前夜 (2009.11.13) 京都東山三塔庵にて

究者が現役で活躍しており、私が65歳で退職したというと、「身体でも悪いのか?何か悪いことでもしたのか?」と尋ねられる。退職してほっとした気持ちもあるが、まだまだこのような思い出話の駄文を書いているんじゃないと感じるので、なんらかの形でもうひと踏ん張りしたいと考えている。

## 参 考 文 献

- 1) Ishida, T. and Saito, T.: Observation of core discing and in situ stress measurements; Stress criteria causing core discing, *Rock Mech. Rock Eng.*, Vol. 28, pp. 167-182, 1995, doi: 10.1007/BF01020150.
- 2) 石田毅, 日比野敏, 北原義浩, 浅井義之: 斜面の転倒・滑落破壊に対する個別剛体要素法の適用性について, *土木学会論文集*, 第358号/III-3, pp. 147-155, 1985年6月, doi: 10.2208/jscej.1985.358\_147.
- 3) Ishida, T., Chigira, M. and Hibino, S.: Application of the Distinct Element Method for Analysis of toppling observed on a fissured rock slopes, *Rock Mech. Rock Eng.*, Vol. 20, pp. 277-283, October 1987, doi: 10.1007/BF01024646.
- 4) Shimizu, H., Koyama, T., Ishida, T., Chijimatsu, M., Fujita, T. and Nakama, S.: Distinct element analysis for ClassII behavior of rock under uniaxial compression, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol. 47, pp. 323-333, 2010, doi: 10.1016/j.ijrmms.2009.09.012.
- 5) Shimizu, H., Murata, S. and Ishida, T.: The distinct element analysis for hydraulic fracturing in hard rock considering fluid viscosity and particle size distribution, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol. 48, pp.712-727, 2011, doi: 10.1016/j.ijrmms.2011.04.013.
- 6) 石田毅, 金川忠: 地殻応力測定結果にみられる岩盤の不均質性の影響, *地震* 2, 第40巻, pp. 329-339, 1987, doi: 10.4294/zisin1948.40.3\_329.
- 7) Kanagawa, T., Hibino, S., Ishida, T., Hayashi, M. and Kitahara, Y.: In situ stress measurements in the Japanese Islands: Over-coring results from a multi-element gauge used at 23 sites, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.*, Vol. 23, pp. 29-39, 1986, doi: 10.1016/0148-9062(86)91664-5.
- 8) 斎藤敏明, 石田毅, 寺田学, 田中豊: 実測結果に基づくわが国の地下岩盤内の初期地圧状態の検討, *土木学会論文集*, 第394号/III-9, pp. 71-78, 1988, doi: 10.2208/jscej.1988.394\_71.
- 9) 石田毅, 金川忠, 佐々木俊二, 浦沢義彦: AEによる岩盤空洞安定性監視に関する基礎実験, *土木学会論文集*, 第376号/III-6, pp. 141-149, 1986, doi: 10.2208/jscej.1986.376\_141.
- 10) Ishida, T., Kanagawa, T. and Kanaori, Y.: Source distribution of acoustic emission during an *in-situ* direct shear test: Implication for an analog model of inhomogeneous rock-mass fracturing, *Eng. Geol.*, Vol. 110, pp. 66-76, 2010, doi: 10.1016/j.enggeo.2009.11.003.

- 11) 石田毅, 北野晃一, 木下直人, 若林成樹: AEと弾性波速度測定による花崗岩ブロックの熱破壊挙動の観測, 土木学会論文集, 第418号/III-13, pp. 153-161, 1990, doi: 10.2208/jscej.1990.418\_153.
- 12) 石田毅, 北野晃一, 木下直人, 若林成樹: AE測定による原位置花崗岩加熱時挙動の観測, 土木学会論文集, 第424号/III-14, pp. 187-196, 1990, doi: 10.2208/jscej.1990.424\_187
- 13) 木下直人, 安部透, 若林成樹, 石田毅: 高温下岩石の力学特性に関する研究, 土木学会論文集, 第561号/III-38, pp. 151-162, 1997, doi: 10.2208/jscej.1997.561\_151.
- 14) 石田毅, 金川忠, 打田靖夫, 浦山克: AEのメカニズム解による地下発電所空洞掘削時岩盤挙動の検討, 土木学会論文集, 第529号/III-33, pp. 19-28, 1995, doi: 10.2208/jscej.1995.529\_19.
- 15) Ishida, T., Kanagawa, T. and Uchita, Y.: Acoustic emissions induced by progressive excavation of an underground powerhouse, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol. 71, pp. 362-368, 2014, doi: 10.1016/j.ijrmms.2014.08.001.
- 16) Cai, M., Kaiser, P. K., Morioka, H., Minami, T., Maejima, T., Tasaka, Y., Kurose, H.: FLAC/PFC coupled numerical simulation of AE in large-scale underground excavations, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol. 44, pp. 550-564, 2007, doi: 10.1016/j.ijrmms.2006.09.013.
- 17) Fakhimi, A., Carvalho, F., Ishida, T. and Labuz, J. F.: Simulation of failure around a circular opening in rock, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol. 39, pp. 507-515, 2002, doi: 10.1016/S1365-1609(02)00041-2.
- 18) Ishida, T., Labuz, J. F., Manthei, G., Meredith, P. G., Nasser, M. H. B., Shin, K., Yokoyama, T. and Zang, A.: ISRM (International Society for Rock Mechanics) suggested method for laboratory acoustic emission monitoring, *Rock Mech. Rock Eng.*, Vol. 50, pp. 665-674, 2017, doi: 10.1007/s00603-016-1165-z.
- 19) Ishida, T., Chen, Q., Mizuta, Y. and Roegiers, J.-C.: Influence of fluid viscosity on the hydraulic fracturing mechanism, *Trans. ASME, J. Energy Resour. Technol.*, Vol. 126, pp. 190-200, September 2004, doi:10.1115/1.1791651
- 20) 陳渠, 石田毅, 佐々木俊二, 松永烈, 水田義明: 花崗岩の粒径が水圧破碎の破壊機構に及ぼす影響について, 土木学会論文集, 第589号/III-42, pp. 179-194, 1998年3月, doi: 10.2208/jscej.1998.589\_179.
- 21) 石田毅: 岩盤破壊音の科学, 近未来社, 231p., 1999, ISBN 13: 978-4-906431-10-6
- 22) 石田毅, 西川直志, 北村晴夫, 田仲正弘, 古屋憲二: 山口市鳴滝地区岩盤崩落地点における変位とAE測定による不安定岩塊の挙動監視, 土木学会論文集, 第722号/III-61, pp. 345-355, 2002年12月, doi: 10.2208/jscej.2002.722\_345.
- 23) 石田毅, 田仲正弘, 西川直志, 北村晴夫, 塩谷智基, 古屋憲二: 山口市鳴滝地区岩盤崩落地点における地表面及び孔内AE測定について, 地すべり, 第39巻, 第1号, pp. 77-86, 2002年6月, doi: 10.3313/jls1964.39.77.
- 24) Ishida, T., Aoyagi, K., Niwa, T., Chen, Y., Murata, S., Chen, Q. and Nakayama, Y.: Acoustic emission monitoring of hydraulic fracturing laboratory experiment with supercritical and liquid CO<sub>2</sub>, *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 39, L16309, 2012, doi: 10.1029/2012GL052788.
- 25) Ishida, T., Chen, Y., Bennour, Z., Yamashita, H., Inui, S., Nagaya, Y., Naoi, M., Chen, Q., Nakayama, Y. and Nagano, Y.: Features of CO<sub>2</sub> fracturing deduced from acoustic emission and microscopy in laboratory experiments, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, Vol. 121, pp. 8080-8098, 2016, doi:10.1002/2016JB013365.
- 26) Ishida, T., Fujito, W., Yamashita, H., Naoi, M., Fujii, H., Suzuki, K., Matsui, H.: Crack expansion and fracturing mode of hydraulic refracturing from acoustic emission monitoring in a small-scale field experiment, *Rock Mech Rock Eng.*, Vol. 52, pp. 543-553, 2019, doi: 10.1007/s00603-018-1697-5
- 27) 石田毅監修・船戸明雄翻訳代表: 岩盤応力とその測定, 京都大学学術出版会, 639 p., 2012. (原著, Amadei, B. & Stephansson, O., *Rock Stress and Its Measurement*, Chapman & Hall, 490p., 1997.) ISBN-13: 978-4-87698-596-8

## 大会記念講演

燃料電池自動車 MIRAI の開発と  
水素社会の実現に向けて

田 中 義 和\*

The Development of Fuel Cell Vehicle and Challenge  
for Achieving Hydrogen Energy Society

by Yoshikazu TANAKA

## 1. モビリティ社会の課題とトヨタの取り組み

クルマはこれまで人々に移動の自由“いつでも、どこでも、どこまでも”を与え、経済・社会・文化の発展に貢献してきた。その一方で、負の側面としCO<sub>2</sub>排出による地球温暖化、環境負荷物質による大気汚染の問題など、クルマは地球環境にさまざまな影響を与えてきた。トヨタでは、環境問題に対応すべき重要な課題ととらえ、「省エネルギー」「燃料多様化への対応」「エコカーは、普及してこそ環境への貢献」との基本スタンスのもと取り組んできた。

ガソリン等の化石燃料は、貯蔵、輸送が容易で、エネルギー密度が高い特徴を有し、車両用燃料として非常に便利なエネルギーである。この便利な化石燃料は「省エネルギー」として大切に使うことが重要である。省エネルギーへの取り組みとして、代表的な省エネ技術としてハイブリッドを紹介する。

## 1.1 省エネルギーの取り組み～ハイブリッド車の開発

トヨタは1997年に世界初の量産型ハイブリッド車プリウスを発売した。技術を普及させるには、主要性能を進化させる必要がある。初代プリウス導入以降、モーター、インバータ、電池などの主要コンポーネントを含むハイブリッドシステムの進化を推進してきた。その結果、プリウスの燃費は大幅に向上し、2015年12月に発売した4代目プリウスの燃費は40.8km/Lを実現した。同時にハイブリッドシステムのコストも大幅に低減し、良品廉価なハイブリッド車を提供できるようになった。

お客様によりクルマの用途や嗜好は異なるので、ラインナップを充実させることによって、お客様に選ん

でいただけるようにすることは、普及させる上に重要となる。現在では、多くのお客様に選んでいただけたおかげで、コンパクト車から商用車まで全カテゴリーにハイブリッドモデルを準備することができた。

その結果、世界販売台数は2012年に初めて年間100万台を達成し、2018年12月に累計で1300万台を超えた。そして同クラスのガソリン車比較でCO<sub>2</sub>抑制効果は、累計で1億トン以上に達した。皆様に選んでいただいたお陰で、まさにハイブリッドは普及技術となったわけである。

## 1.2 燃料多様化への対応

燃料多様化への対応については、ガソリン代替エネルギーをEV、PHV、FCVのような技術を用いて、車両に展開することになる。ここで、電動化と電気自動車の定義について触れたい。電動化については、特に日本のメディアで、EVと一言で語られていることが多いが、電動化と電気自動車EVは別物である。「電動化」と言えば、EVと連想される方多いかもしれないが、私たちトヨタは、HV、PHV、FCVもモーターやバッテリーを搭載した「電動化自動車」だと考えている。1300万台の電動車の販売実績は、1300万基のバッテリーとインバータ、2600万基のモーターの量産化をしたことを意味する。そして開発に携わる技術者は4500名にも上り、電子制御や回生ブレーキなど車両電動化の技術、ノウハウの膨大な蓄積を行ってきた。また、ハイブリッドに搭載されるバッテリー、インバータ、モーターの3要素はPHV、EV、FCVのすべての電動車の基盤となる技術である（図1）。

トヨタは、EV開発のカギは「電池」と考えており全固体電池の研究を長年続けている。全固体電池の特長は大きく2点あり、1点目は、耐熱性が高いということ、従来の液系電池の耐熱温度が約60℃なのに

\*トヨタ自動車株式会社



## 2. 燃料電池自動車開発の背景

まずはじめに水素のメリットについて考えたい。水素には、以下の3点のメリットがあると考えられる。

1点目は、水素は使用過程においてCO<sub>2</sub>インパクトがゼロである。地球温暖化が進む中、低炭素社会を実現する上で非常に重要な特性である。

2点目は、エネルギーセキュリティの観点からのメリットである。多様な一次エネルギーから作り出すことができ、資源量に不安がなく、非常に豊富に存在する。また、輸送・貯蔵の観点でも優れている。風力や水力、太陽光発電などで作った電気で水を分解することにより水素を製造し、貯蔵・輸送を行うことで、自然エネルギーの非計画性を補うとともに、エネルギー地域偏在を是正することができる。また、下水汚泥から作り出すこともでき、資源を持たない日本にとって、将来非常に有望なエネルギーとして期待されている。

3点目は、クルマとして使用する上でのメリットである。すなわち燃料電池自動車（FCV）の燃料として使うことができる。燃料電池（FC）スタックで水素と空気中から取り込んだ酸素の化学反応により電気を発生させ、その電気でモーターを駆動し走行する。「内燃機関と異なり、水素を燃焼させることなく、化学反応により発電するためエネルギー効率が高い」、「充電ではなく燃料充填のため、充填時間が短い」、「走行中には環境負荷物質を排出せず、排出するのは水だけ」という特徴を有している。更に、電気に比べエネルギー密度が高く、航続距離の面で有利である。

以上のことから、トヨタでは水素を将来の有効なエネルギー、FCVを究極のエコカーと位置付けて、開発を推進してきた。

### 3. 日本初の量産FCV“MIRAI”の開発

まず初めにトヨタのFCV開発の歴史を紹介する。

トヨタにおいてFCVの開発は、プリウスの開発が始まる前の1992年から始まっており、25年以上の歴史がある。最初にお披露目したのは、1996年の第13回電気自動車シンポジウム（EVS13）。2002年12月には、世界に先駆け、SUVタイプのFCVを日米に限定導入、2005年モデルでは、国内で始めて型式認証を取得した。誠実に、愚直に、開発に取り組み続け、量産車の発売の2014年までにFCVの総走行距離は200万キロに達した。

これまでのFCV開発の評価結果をフィードバックし2014年末に日本初の量産型燃料電池自動車MIRAI（図3）を発売した。

MIRAIの開発コンセプトは、「H<sub>2</sub> PIONEER for the next Century」。自動車の次の100年のために、水素エ



図3 燃料電池自動車MIRAI 2014年12月15日販売開始

ネルギー社会実現の先駆者となるクルマ、これまでにない新しい価値を提供できるクルマとして開発した。

ボデー形状は開発コンセプトを踏まえ、以下の点を考慮しセダンとした。すなわち、①FCVのクルマとしてのうれしさ（走りの良さ、燃費の良さ）を最大限に引き出せる、②さまざまなお客さまに選んで頂ける、③小型コンパクトなユニットが不可欠であり、今後の車種展開が容易となる。

そして小型、高効率な新開発のトヨタFCシステムを搭載し、一目でFCVとわかる専用先進デザインを採用した。

表1 MIRAIの主要性能

項目	性能
スタック最高出力	114kW
航続距離 JC08モード社内測定値	約650km (約700km <sup>*1</sup> )
燃料充填時間	約3分

\*1) 2016年度以降に運用開始されている82Mpaステーションでは、約700kmの走行が可能

#### 3.1 新開発のトヨタフューエルセルシステム

FCV MIRAIには、過去23年の開発をフィードバックし、その集大成としてさらなる進化を遂げた「トヨタフューエルセルシステム」が搭載されている。ハイブリッド車開発でも同様であるが、トヨタにおいては、主要な新技術は設計・製造を内製とし、技術を手の内化することで、品質の確保、低コスト化を推進している。FC開発では、主要コンポーネントであるFCスタック、高圧水素タンクをトヨタで開発・製造している。ちなみにFCV開発において、燃料電池スタック、高圧水素タンクを共に開発製造している自動車メーカーはトヨタだけである。

自動車用FCスタックの重要な特性は、如何に小型で高出力を実現するかという点である。ステップバイ

## 新型FCスタックの高出力密度化(高性能・小型化)

New fuel cell stack with increased output density (enhanced performance, more compact sized)

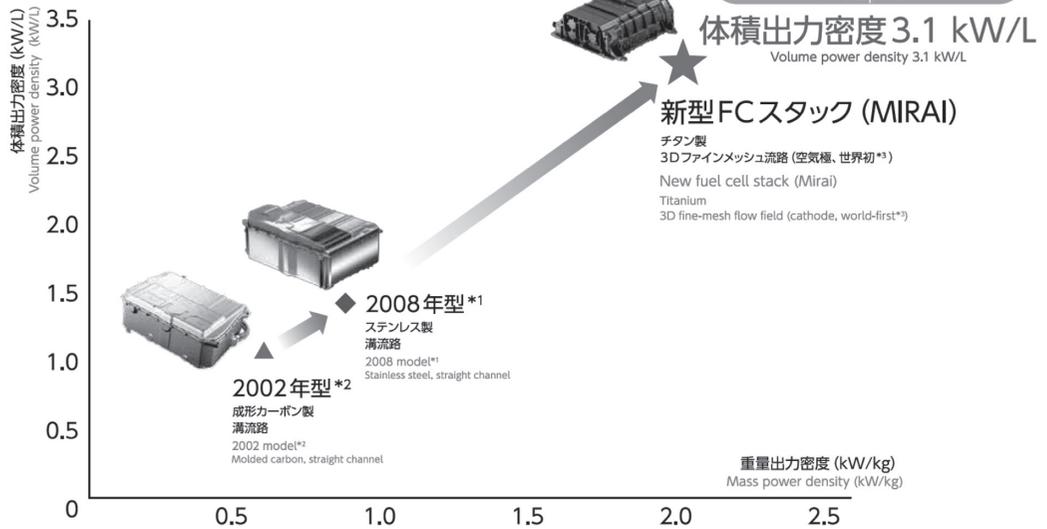


図4 トヨタFCスタック出力変遷

ステップで開発を積み重ね性能向上と小型化を実現してきた。体積出力密度は、2008年比2.2倍の3.1kW/Lの世界トップレベルを達成した(図4)。その実現にあたっては、スタックは3Dファインメッシュ流路の新採用や、電解質膜の薄膜化、さらには、反応性の高い新開発のPt/Co合金触媒の採用が大きく寄与している。と同時にプラチナの使用量も2008年モデルの1/3に減らすことができた。この技術を製品として成り立たせることは、すぐれた設計技術が重要であることは言うまでもないが、設計技術同様に重要なのが、生産技術である。日本のものづくりの強みを生かした非常に高精度な加工技術、非常に高い信頼性を実現する高品質なものづくり技術があって初めて成立するものである。

高圧水素タンクは、世界トップレベルのタンク貯蔵性能5.7wt%を達成。その実現にあたっては、FCスタック同様、炭素繊維強化プラスチック層構成の革新(プラスチックライナー形状の改良とカーボン繊維積層パターンの効率化)により炭素繊維の使用量を約40%削減並びに大幅な軽量化を達成した設計技術はもちろん、高精度なものづくり・材料技術が不可欠である。

また、水素安全に関する対応は、量産燃料電池自動車としては、非常に重要である。水素は空気に対して4~75%で混ざった時に燃える可能性がある。但し水素は非常に軽い気体で拡散が早く、滞留しにくいので、仮に外部に漏れた場合でも、すぐに可燃濃度範囲より稀薄になり、着火する可能性は非常に低い気体である。

従って水素安全に関しては以下のような考え方で万全を期している。

- ①漏らさない：非常に強固な水素タンクに貯蔵し、衝突事故にも漏らさない。万一漏れても直ちに水素の漏れを検知して、水素タンクのバルブを遮断し、水素の漏れを止める。
- ②溜めない：水素タンク、配管などの水素系部品は車室外に配置することで、漏れた水素が車室内に入らないようにし、さらに車外でも溜まることのないような構成にしている。

### 3.2 FCVならではのFun to Drive

将来の水素エネルギー社会への先駆者と言う位置づけを考えると、魅力的でFun to Driveなクルマとし、皆さんに欲しいと思って頂けるクルマにすることが極めて重要である。

電動車両の走りの良さは、モーター走行ならではの、振動が少なく、トルクフルでレスポンスが良い点である。それらを引き出し、体感して頂くために、クルマの振動の少なさを際立たせるフラットで良好な乗り心地、更にレスポンスの良さに負けない操縦安定性の実現に重点を置いて開発した。

具体的にはFCスタック、高圧タンクのような質量の大きい部品の床下、車両中心部への配置により、低重心でミッドシップのような優れた前後バランスを実現した(図5)。

さらにFCシステム部品を搭載するためのモータールームのクロスメンバーや床下のスタックフレームの

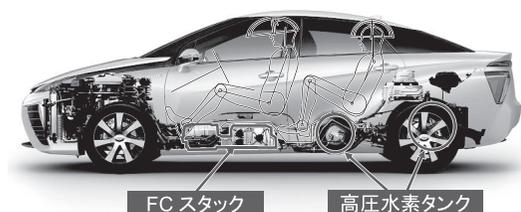


図5 ユニット搭載レイアウト図

活用，スポット打点の追加，ボデー接着剤の採用，Rrサスペンション周辺のブレース追加など多くのアイテムを織り込み，トヨタの代表的なFF車の約1.6倍のねじり剛性を実現した。低重心，重量バランスの良さとの合わせ，良好な乗り心地と操縦安定性を実現し，結果として，「モーター走行による走りの良さ」がうまく引き出されたクルマに仕上げることができた。

車両性能としてのNV性能（静粛性）は，本開発において，最もこだわった点である。エンジンがないMIRAIにおいては，お客様の静かさへの期待値は当然高くなる。しかし，エンジンノイズがない分，従来車では気にならないノイズが目立ってくる。つまりモーター走行の静粛性，その良さを体感できるようにするためには，通常よりも高いレベルの静粛性能が求められる。そのため，「風切り音」や「ロードノイズ」の低減に対しては，全ドアアコースティックガラス採用などによる遮音の徹底，ドアミラー周辺の徹底的な風切り音対策や制振対策の徹底などを行い，高い静粛性を実現した。

### 3.3 FCVならではの新たな機能（外部給電機能）

燃料電池自動車の航続距離の長さは供給電力容量に比例する。燃料電池で発電した電力を走行に使用するかわりに外部へ供給できるようにし，災害時などに備えるための非常時外部給電機能を開発・設定した。ラゲージ内にCHAdeMO端子のDC出力を配置，外部インバータとの組み合わせにより，最大9kWの給電が可能となる。DC/ACインバータ車載せずDC出力とした理由は，非常時の使用が前提であり，大型インバータを常時車載するのは効率的でないと考えたためである。また，DC出力端子にCHAdeMO端子を採用したのは，日本ではEVのDC給電－放電の標準プロトコルとなっており，FCVの外部給電機能をEV用と標準化を行うことで汎用性を持たせるためである。給電可能な電力量は最大60kWh程度であり，電気自動車をしのご電力量を有し，長時間の給電が可能となる。また，HVやPHVで採用されている1500WのAC給電

機能も設定し，車内でのAC電源としての活用や外部インバータなしでの非常時給電への対応も可能とした。

## 4. 水素社会実現にむけたチャレンジ

FCVの普及，水素エネルギー社会の実現は一自動車会社だけでできるわけではない。政府や自治体，さらには，インフラメーカーを含めた多くのメーカーが参入し，みんなで継続的に取り組んでいくことが重要になる。そのために，トヨタは以下のような取り組みを続けている。

1点目は，燃料電池関連特許の無償提供である。多くのメーカーに燃料電池事業に参入してもらえるよう，自動車業界では異例のことであるが，トヨタが保有する燃料電池関係特許約5680件の無償提供を行っている。

2点目は，FCシステムのコスト低減である。FCVを普及させるためには，良品廉価を実現する必要がある。コスト低減についてはMIRAIのFCシステムコストで2008年比1/20を実現してきたが，今後は更なるコスト低減をすると共に更なる性能向上を行い，FCVがもっとよりよいクルマになるよう努力し続けることが重要である。

3点目は，FCVの生産台数，販売台数の拡大である。MIRAIの生産，販売台数は，2015年のグローバルで年間700台からステップバイステップで生産能力を向上し，2017年からは年間3000台に増強した。今後は，新たな技術開発，生産技術開発を行い2020年頃以降には，年間3万台以上の生産，販売を目指している。

4点目は商品ラインナップの充実である。水素エネルギーの可能性を広げるため，乗用FCVのみならず，FCバスやFCトラックなどの商用FCV，FCフォークリフトなど産業用FC，家庭用燃料電池などの技術開発にグループ企業とともに取り組みを加速させている。

5点目は水素エネルギー普及を目指す仕組みづくりである。2018年2月日本における，水素ステーション本格整備に向けた新会社がトヨタも加わり，日本水素ステーション合同会社（JHyM）として設立された。この取り組みは，インフラ事業者，自動車会社，金融投資家が連携する世界初の取り組みで，FCVの普及と水素ステーションの早期自立化を促進するだけでなく日本における水素社会の実現に貢献するものである。

さらには，世界でも様々な取り組みがスタートしており，トヨタも参画している。2017年1月スイス・ダボスで開催されたWorld Economic Forumの場でHydrogen Councilが発足した。水素社会の実現を，CEOによるイニシアチブでグローバルに推進する世界で初めての取り組みである。発足時，13であった参

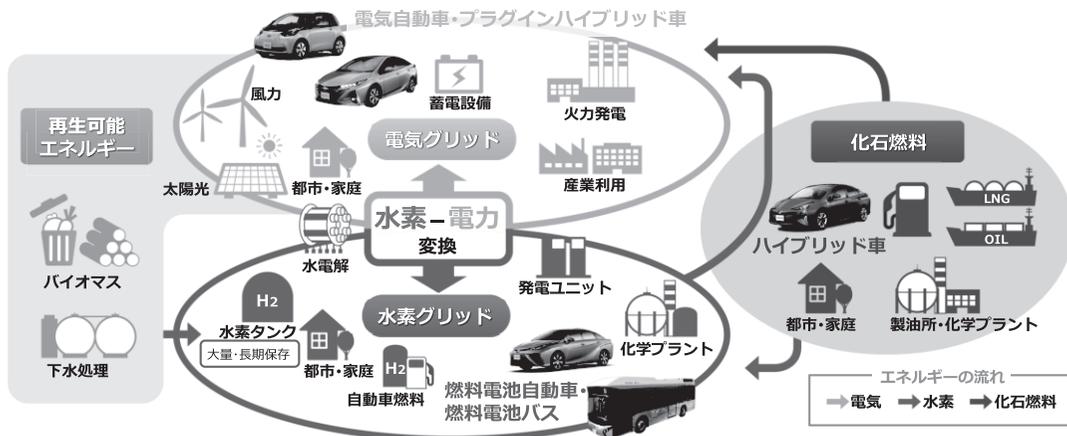


図6 目指す水素エネルギー社会

画企業も、現在、53の企業が参画するまでに規模が拡大している。石油・ガス、エネルギー、科学・テクノロジー、そして自動車の分野において、国際的なリーディングカンパニーが、業界や国を越えて協力し合い、水素社会の実現に向けた取り組みを加速している。

そして、最終的に目指すべき姿は、水素エネルギー社会の実現である。トヨタの考える水素社会は、水素エネルギーのみで成り立っている社会ではない。電気と水素を活用し、多様なエネルギーから成り立っている社会である(図6)。現在、水素は身近なものではない。車で普通に水素が使えるようになれば、水素エネルギーは身近なものになる。そうすれば水素エネルギーへの理解が進み、グリーン水素、低コスト水素開発が進む。さらには、水素発電など、自動車以外の水素活用が進み水素エネルギー社会の実現につながる。

私たちがこの燃料電池自動車 MIRAI でもたらそうとしたものは、モビリティのイノベーション、そして水素社会実現に向けたイノベーションである。

自動車産業は、非常に裾野の広い産業である。MIRAIが先駆者となり、エネルギー問題、環境問題を解決し、サステナブルモビリティとして今後も産業、経済を支える存在でありたい。さらに、燃料電池自動車がきっかけとなり、水素社会へのイノベーションを起こしたい。水素の作り方、活用の仕方など水素エネルギー社会実現に向け、新しい技術開発が進むきっかけになればと思う。水素が身近なエネルギーとなり、FCVが普及段階に入るには何年もかかる長い取り組みになる。このMIRAIが支持されることで、水素社会実現に向けた確実な第一歩が踏み出されることを願ってやまない。

## 5. 謝 辞

本報は2019年6月1日水曜会大会における講演をまとめたものである。拙い発表ではあったが、伝統ある本会において機会を与えていただいた宅田先生はじめ関係各位に深く感謝したい。

## 大会記念講演

鉄鋼研究の面白さ：  
ミクロ組織；マルテンサイト変態；金属疲労

津 崎 兼 彰\*

Steel Research is Always Interesting:  
Microstructure; Martensite; Metal fatigue

by Kaneaki TSUZAKI

## 1. はじめに

令和元年6月1日の水曜会大会で講演をする機会を頂いた。辻伸泰教授から内々に講演依頼を受けた平成31年2月以来、何をテーマにするか色々と考えた。いろいろご紹介したい研究ネタはある。しかし大会に参加される会員の皆様は何を求めておられるかを考えると、それは単なる研究紹介ではないと思った。私だからこそできる話を期待されていると思った。私は働き場所を京都大学(1985~1997年)、NIMS(1997~2013年)、九州大学(2013年~現在)と変えて、ゆえに様々な鉄鋼研究プロジェクトにかかわることが出来た。講演内容についていろいろと考えたが、この私の経験をお話ししようと思った。すなわち、津崎が関わった鉄鋼に関する研究プロジェクトのいくつかを紹介しながら、『鉄鋼研究は楽しい』、『鉄鋼研究には重要課題が満載』というメッセージを伝えようと試みた(図1)。

## 2. 自己紹介と講演内容

講演冒頭で、図2を示した。世界の年間粗鋼生産量の推移である。その中に私の経歴を示した。私は1976年(昭和51年)4月に金属加工学教室の田村今男先生・牧正志先生の研究室に配属になった。以来、現在まで鉄鋼研究を続けている。その中の節目となる話題として3つをあげた：(1)1997年、京都大学からNIMSに異動した年であり、『超鉄鋼研究プロジェクト』がスタートした年である。鉄鋼研究のプレゼンス向上を目指したプロジェクトであった。強度2倍・寿命2倍が旗印で、ミクロ組織制御、特に結晶粒微細化に力が置かれた。(2)2011年3月、東日本大震災が起こった。被災地でもあった茨城県つくばのNIMS研究者としては、「防災と減災につながる仕事をやらねばならぬ」、「2011年4月にスタートする(した)NIMS第3期中期計画を書き換えてでもやらねばならぬ」との気概か

## 当日の講演概要と狙い

津崎がリーダーとして関わった鉄鋼に関する研究プロジェクトのいくつかを紹介しながら

メッセージ：  
『鉄鋼研究は楽しい』  
『鉄鋼研究には重要課題が満載』  
を伝えたい。

- (1) 超鉄鋼プロジェクト 1997-2005(9年間)  
(2) 社会インフラ再生PJ 2012-2015(4年間)  
(3) 科研(S)疲労き裂PJ 2014-2020(6年間)  
そして  
4つの配布資料 を使って。

図1 当日の講演概要と狙い

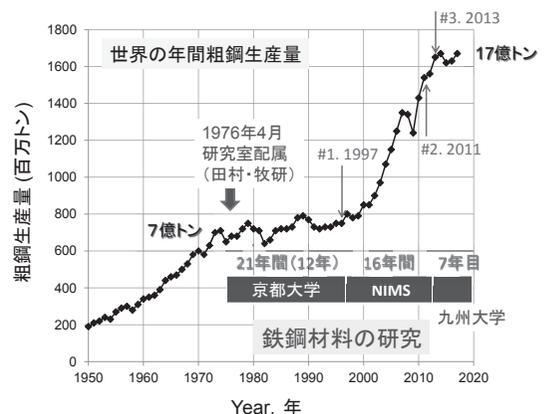


図2 世界の年間粗鋼生産量の推移、津崎の経歴、そして鉄鋼研究の3つの節目。

\*九州大学大学院工学研究院機械工学部門 主幹教授

ら、『社会インフラ再生プロジェクト』を2012年4月からスタートさせた。疲労寿命に優れた制振ダンパーの開発において、相安定性とマルテンサイト変態がカギを握った。(3)2013年、4月にNIMSから九州大学機械工学部門に異動した。停滞と逼塞感のある金属疲労研究に風穴を開けることを野口博司教授より要請されて異動した。3年間、金属疲労をそのABCから学びなおした。そして、2016年からは科研費基盤研究(S)で『常識を破る鉄鋼研究の疲労特性：疲労き裂研究の新機軸』をスタートさせた。微小疲労き裂の進展はマイクロ組織とマルテンサイト変態に強く依存することを念頭に研究を進めた(進めている)。

講演ではこれら3つの研究プロジェクトの研究成果概要とともに、その時代の鉄鋼研究の空気と私の思いについて話をさせていただいた。研究成果については本や解説そして論文で容易にアクセス可能である。そこで本稿では、当時の鉄鋼研究の環境と空気そして私の思いを記させていただく。

### 3. 鉄鋼研究の説明責任(節目#1：1997年頃の空気)

まず超鉄鋼研究プロジェクトがスタートした1997年頃の鉄鋼研究環境についてお話しする。当時、『鉄鋼の2文字が入ると科研費に採択されない』とまことしやかに語られていたことを思い出す(図3)。以下の文章は2007年に日本金属学会まてりあ談話室に寄稿したものである(まてりあ、46巻6号(2007)、432頁)。当時の雰囲気感を良く伝えていると思っている。

\*\*\*\*\*

#### ◇鉄鋼に未だ研究することがあるのですか？

鉄鋼以外を専門とする同業の材料研究者から始めてマスコミの方まで様々な分野の方々から質問を受け

る。この質問は少なくとも過去30年近く継続して発せられている。私をはじめとして鉄鋼材料に関わる技術者研究者が社会に対して十分な説明をしてこなかったと反省せざるを得ない。鉄鋼材料研究に関わっている皆さんはこの質問にどのように答えるであろうか。「はい、まだまだ多くの研究課題があります」と直球を投げ返すのだろうか。しかし、この答え方は機能しない。次に「ではどんな研究ですか？」と問われ、研究課題の詳細を説明するはめになり、その詳細は一般の方には理解されないために、結局納得して頂けないのである。抗ガン剤研究と比べると説明回答ははなはだ難しい。

現在、表題の質問に対して私は次のような回答を試みている。まず逆に、現時使われている材料で「極めつくした材料、研究し尽くした材料、研究をやめた材料」というのはあるのですか？と問い返している。答えは明快で否である。現在使われている材料において技術開発の進歩をやめた材料はないのである。その材料を使って製品をつくるのだから、製品の競争力アップのために材料研究は営々と続けられている。

もちろん鉄鋼は過去に膨大な研究があるから、新たな技術開発研究はより高度且つ困難であるが、自動車や機械などの鉄鋼製品の競争力アップのためには材料研究課題に知恵を絞って取り組まなければならない。材料の技術開発研究をやめたら競争力を失い、関連産業が廃ることになる。「研究課題があるからやる」は受身、「研究課題を見出す」という能動的姿勢が研究者に求められている。

こんな感じの回答なのだが、相手の方々には「確かに加工貿易で成り立っている日本なのだから工業製品の競争力アップに構成材料の技術開発は不可欠で、やめたら産業が廃れるだけですわ」と納得していただけたことが多いようであった。

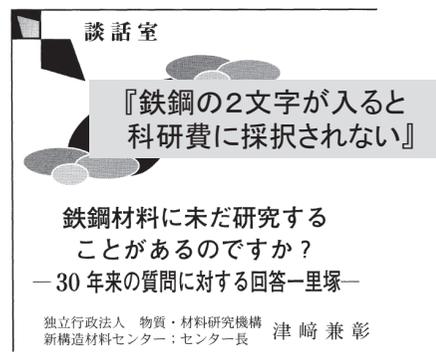
#### ◇ではどんな研究が大切なのですか？

研究課題の詳細に立ち入ることなく次の質問にどのように答えたらよいだろうか。基盤材料としての歴史が長いだけに研究対象が多岐にわたりしかも高度化しているので、一般の方々に理解していただける回答を見出すのが難しい。私は、NIMSが1997年に始めた9年間の『超鉄鋼プロジェクト』にかかわってきた。そこで掲げた、資源枯渇時代における合金元素を使わないものづくり技術の重要性は、比較的的理解を得やすい回答例であった。資源枯渇時代というような近未来における社会変化、環境変化に対応する研究ということであろうか。現在進められている国家プロジェクトの「元素戦略」はこれ答える力を秘めている。

#### ◇質問は続く

「鉄鋼の研究を税金でやる必要があるのですか？な

## 1997年頃の鉄鋼研究環境



まてりあ 46巻6号 (2007), p.432

図3 1997年頃の鉄鋼研究環境。

ぜ民間企業ではなく大学や公的研究機関がやるのですか？（りっぱな鉄鋼会社があるのに...）」と質問は続くのである。

非常に難しい質問なので、これも直球回答は機能しないだろう。反問することにしたい。「しかし、りっぱな電子機器メーカーがあるのに半導体研究を国費でやっていますよね。」「またりっぱな製薬会社があるのに抗がん剤研究を大学でやっていますね。」質問者は少しの間戸惑われるようである。そして「産業としての、また国民生活への重要性影響力が違います。」と切り返されることが多い。

しかし、そうだろうか。日本は加工貿易で成り立っている。資源の少ない我が国は食料、資源などを世界各国から買わせて頂いている。輸入総額は毎年約50兆円である。そしてこれとはほぼ同額を輸出によって得ている。買って頂いているのは主に自動車、機械、電子機器などの加工製品である。その製品競争力を支えているのが金属材料であり、その生産量の95%以上(mass%)は鉄鋼材料なのである（日本における年間生産量約1億トン）。この金額と重量を伝えると質問者の方も、民間のみではなく国全体として取り組むべき研究課題であることを、少しはご理解いただけるようである。

#### ◇でも新規性がないでしょう

最後にこの質問を受ける。歴史ある材料は研究に値しないとの認識が強いようである。しかし思い返して欲しい。我々は今までにない全く新しい概念の製品やシステムのみを作り出して生活しているのではない。既存の分野をよりよくする発明発見が持続的に行われてこそ新しい概念の製品も生まれるのである。つまりオアシスとそこに育つ樹木のような関係である。オアシスがなければ樹木は育たない。加工貿易で成り立つ日本の科学技術のオアシスが鉄鋼材料研究だと言い切りたい。

そして今あるオアシスを豊かにする可能性に限りはないのである。この地球では数え切れない人々が生まれ好奇心を枯らすことなく生活をしてきた。歴史が証明している。可能性には限界がないことを。壁があるとか可能性が見えないとしたら、それは我々の感度が鈍っているか未熟なだけである。鉄鋼材料にも我々を感激させる発見と可能性とがあるのだ（実際に感激の雄叫びを上げたことがあります）。

#### ◇おわりに

私がかかわった超鉄鋼プロジェクト9年間にこのような質問を幾度となく受けた。多額の税金を使わせていただいたからだろう。これら質問は重要であり適切に答えていかないと若者を含めて多くの方々を失望さ

せることになると思っている。

自分なりに考えた回答の一里塚をここに記した。ご批判ご鞭撻をお願いしたい。そして出来れば一緒になって、生産現場で働く若き技術者研究者と大学で学ぶ若者が高い志をもって楽しく活動できる環境をつくるために、一緒に知恵を絞っていただきたい。

\*\*\*\*\*

以上が、2007年までありあ談話室の記事である。水曜会会員の諸氏に聞きたい。令和元年の今、鉄鋼研究の説明責任はしっかりととらされて、鉄鋼研究の重要性は的確に認識されているだろうか。

#### 4. 太くしたい好奇心の円環

前項のあたりあ談話室で「そして今あるオアシスを豊かにする可能性に限りはないのである。この地球では数え切れない人々が生まれ好奇心を枯らすことなく生活をしてきた。歴史が証明している。可能性には限界がないことを。」と書いた。水曜会大会講演では、この好奇心が大切だとお話した。これについて2008年にJRCM ニュースに「ものづくり力の源泉；好奇心の円環」と題して寄稿した（JRCM ニュース、2008、No.260）。水曜会大会講演でも参考資料として配布させていただいた。その内容を以下に示す。

\*\*\*\*\*

#### ◇ものづくり力の源泉；好奇心の円環

「材料研究であるから研究対象材料は使われて欲しい。」使われるためには材料だけの特性ではなく社会情勢に関する因子が強く反映する。なにより新しい価値の発見が必要である。この場合の価値は経済的価値が第一だろう。環境・資源・エネルギー・安全問題も含んだ経済的価値である。この価値を生み出す材料研究の道は平坦ではない。その道は険しく、苦しい作業が必要である。しかし、苦しいばかりでは技術者研究者は生きていけないし、活力がでない。出来ることなら日々の営みは楽しくありたい。そのためには継続的な新しい可能性の発見が必要だと考えている。それを実現するのが「好奇心の円環」である。

図4はArt(技能)、Science(科学)、Engineering(工学)、Industry(工業)での好奇心のあり方とそのつながりの重要性を訴えている。関西弁を使わせていただくと、Artの好奇心は「これおもしろいやん」であり個性化、Scienceは「どないなってんにゃろ」で普遍化、Engineeringは「どないかしたろ」で一般化、そしてIndustryは「もうけたろかい」で差別化、として特徴づけたい。Engineeringの一般化は説明を要するかと思う。Scienceで特定因子のもとで普遍化された現象も、それが一般的な作業環境（多因子環境）で使えな

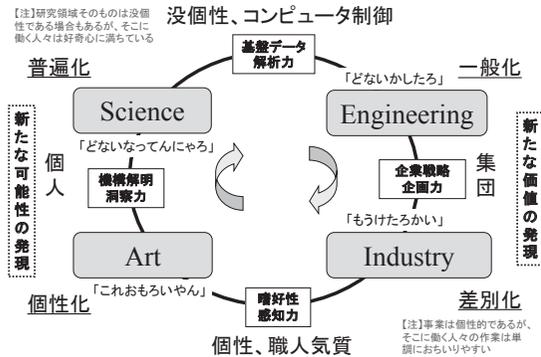


図4 新たな可能性と価値を生み出すための好奇心の円環

くは意味がない、特別な合金やプロセスだけで発現する現象では使えない。Engineeringの好奇心は、一般的に使えるための「どないかしたろ」である。そして、経済活動と直結するIndustryでは他と同じことはできない、従って差別化である。

集団としての作業であるEngineeringとIndustryが新しい価値の発見を生み出し、どちらかといえば個人的作業であるArtとScienceが新しい可能性の発見を生み出すと考える。それらが相補的に関連して（円環を作って）スパイラルアップするのである。特性ばらつきのない部品をつくるIndustry分野で、その中の異常値に敏感に反応し「これおもしろいやん」と可能性の泉を深くするArtist(技能者)がいる。おもしろい現象があるからこそ「どないかってんにやろ」とScientist(科学者)が新しいパラダイムづくりに取り組む。このArtとScienceをしっかりとつなぐことが新しい可能性の発見につながる。新しい可能性の発見がなければ、新しい価値は生み出せないと言い切りたい。4分野での個々人の営みがそれぞれの好奇心にしっかりと支えられて円環を作るとき、逞しいものづくり力が形成され、持続的社會日本、加工貿易立国日本が実現できると考えている。

われわれは太陽系という資源に限りのある閉じた世界で営みを続けてきた。数え切れない人々が生まれ生活をしてきた。歴史が証明している。可能性と価値そして好奇心には限界がないことを。壁があるとか可能性が見えないとしたら、それは我々の感度が鈍っているか未熟なだけである。「資源は有限、しかし創造は無限」である。「志を高く目線を上げて」進みたい。

\*\*\*\*\*

以上が、2008年の私の思いである。好奇心が大切という思いは今も不変である。

【注】図4は2008年のJRCMニュースのオリジナル図に今回のためにいくつか追加したものである。

## 5. 鉄鋼基礎研究の重要性（節目#2：2011年）

二つ目の節目と話題では、実用化に至った疲労寿命に優れる鉄鋼制振ダンパーの開発研究経験の中で得た鉄鋼研究の重要性について紹介したい。

「社会インフラ再生プロジェクト」は、正式名称「社会インフラ復旧・再生に向けた構造材料技術の開発」として震災の翌年2012年4月にスタートして2016年3月に終了した。2011年夏に定められた2012年度科学技術重要施策アクションプラン「復興・再生並びに災害からの安全性向上」に基づくもので5年以内の実用化が求められた。施策概要は以下のとおりである。

\*\*\*\*\*

### ◇施策概要（アクションプランに記載）

東日本大震災からの復興・再生を早期に遂げるとともに、地震や津波等による自然災害や重大事故等から国民の生命、財産を守り、より安全、かつ豊かで質の高い国民生活を実現するためには、災害から住まいを守り、造っていくことが不可欠である。本施策においては、今後発生が懸念される地震・津波に備え、我が国がこれまで培ってきた、低コスト高強度材料・耐熱材料等の世界最先端の材料開発技術を生かし、構造物の耐震性と耐火性の飛躍的向上に資する構造物や補修技術を開発する。その結果、被災地における新設構造物、あるいは被災した構造物の補修にこれら材料や技術が用いられることにより、従来よりも耐震性の高い住宅、工場、ビル、公共建築物の社会インフラが実現する。

※我が国の物質・材料研究の中核的機関である独立行政法人物質・科学研究機構の中期目標及び中期計画を変更し、新たにプロジェクトを発足させ、5年以内の実現化を目標にして、耐震性・耐火性に資する材料・技術の研究開発を加速させる。

\*\*\*\*\*

結果として、疲労寿命が長い、つまり何回もの大型地震に耐えられる新たな鉄鋼制振ダンパーを開発して、JPタワー名古屋に実装することが出来た。その際に共同研究者であった竹中工務店技術者・櫛部淳道氏が言われたコメントに感銘を受けた。構造材料・鉄鋼における基礎研究のあり方に対するメッセージであった。そのコメントの要旨は次のとおりである。

『新しい技術は特殊と見られがちである。特に、人命にかかわる技術では、技術の信頼性を保証するために特性発現のメカニズム解明を含む学術的裏付けと体系的な材料データの構築が必要である。また長い使用期間の中で環境が変化する。このために将来を見据えた継続的な基礎研究の取り組みが必要である。』

新事業開発において通常は、「基礎研究→死の谷→応用研究→製品開発→ダーウィンの海→ビジネス展開」と云われて、基礎研究は最初に位置するのみである。ビジネス展開時には基礎研究はもはや無用というのである。これは製品寿命の短い電子機器部品材料の場合にはあてはまるだろう。しかし、使用期間が長い鉄鋼材料にはあてはまらないのである。多くのことを経験したプロジェクトであったが、今振り返って、構造材料研究におけるメカニズム解明の重要性と継続的研究の重要性について学んだことを記したい。

### 6. 金属疲労研究の新展開（節目#3：2013年）

2013年4月に異動した九州大学工学研究院の着任部署は機械工学部門材料力学大講座材料強度学研究室である。移動してまず認識したことは「自分を含め材料工学分野の研究者は疲労き裂のことを知らない」であった。逆にこれは、材料工学分野の研究者は金属疲労研究に貢献できる余地があることを示している。

学生と一緒に金属疲労き裂進展について勉強した最初の三年間であったことを正直に申し上げる。導いてくれた先生は盟友の野口博司教授であった。基礎知識を得てからは野口教授が提案する（要望する）変形が起こるミクロ組織探索を行った。一つの成果がScience誌に掲載された準安定ラメラ組織を持つTRIPマルエージ鋼である。その優れた疲労き裂進展抵抗能のメカニズムについては、まてりあ最近の研究

で紹介したので参照いただきたい。（「準安定ラメラ組織の疲労き裂進展抵抗」小山元道、野口博司、津崎兼彰：まてりあ、58巻4号（2019）206頁）。

ここでは、その時の空気を伝えるためにScience誌掲載時の2017年3月7日九州大学プレスリリース記事（図5）を紹介する。

\*\*\*\*\*

#### ◇『骨のような壊れ方で、金属疲労に強いミクロ構造を鉄鋼材料で発見 —安全安心に貢献する金属疲労研究の新展開—』

輸送機器や機械類の破壊事故の約8割は金属疲労が原因とされています。このため、金属材料と金属部品の疲労特性を正しく理解し評価すること、また疲労特性に優れた金属材料を地道に開発し製造することは、地味な営みではありますが、安全安心な社会基盤の実現にとって重要です。

金属疲労破壊では、一度に加える力は小さくても何度も繰り返して加えることで、材料表面に微小なき裂が発生しそれが拡大伝ばして次第に大きく広がり最終的な破壊に至ります。九州大学大学院工学研究院機械工学部門の小山元道助教、野口博司教授、津崎兼彰教授の研究グループは、この疲労き裂の発生と伝ばを抑えるために、き裂先端部分での局所的な力学状態と金属ミクロ構造の關係に注目した研究を行いました。き裂発生抑制の為にき裂周囲の金属が膨張や硬化する構造、き裂伝ば抑制の為にき裂面同士の摩擦が起こる



九州大学

九州大学広報室

〒819-0395 福岡市西区元岡 744

TEL:092-802-2130 FAX:092-802-2139

MAIL:koho@jimu.kyushu-u.ac.jp

URL:http://www.kyushu-u.ac.jp

PRESS RELEASE (2017/03/10)

#### 骨のような壊れ方で、金属疲労に強いミクロ構造を、鉄鋼材料で発見 —安全安心に貢献する金属疲労研究の新展開—

輸送機器や機械類の破壊事故の約8割は金属疲労が原因とされています。このため、金属材料と金属部品の疲労特性を正しく理解し評価すること、また疲労特性に優れた金属材料を地道に開発し製造することは、地味な営みではありますが、安全安心な社会基盤の実現にとって重要です。

金属疲労破壊では、一度に加える力は小さくても何度も繰り返して加えることで、材料表面に微小なき裂が発生しそれが拡大伝ばして次第に大きく広がり最終的な破壊に至ります。九州大学大学院工学研究院機械工学部門の小山元道助教、野口博司教授、津崎兼彰教授の研究グループは、この疲労き裂の発生と伝ばを抑えるために、き裂先端部分での局所的な力学状態と金属ミクロ構造の關係に注目した研究を行いました。き裂発生抑制の為にき裂周囲の金属が膨張や硬化する構造、き裂伝ば抑制の為にき裂面同士の摩擦が起こる構造に着目して、画期的な疲労特性を示す鉄鋼を見出しました。特に「層状状態を要素に含む階層性原子集団の金属ミクロ構造」によって、鉄鋼が動物の骨のような粘りのある壊れ方をするため、き裂伝ばが抑えられて疲労寿命が格段に延びることを明らかにしました。本成果は、応用面実用面への貢献はもちろん、疲労などの力学特性に優れた金属材料の開発に貢献する金属物理学、また鋭いき裂先端という特殊な力学状態を解析する破壊力学の両学問分野にとっても新展開をもたらすものとして期待されます。

図5 3つ目の節目：2013年からの活動の成果：金属疲労研究の新展開を示すプレスリリース記事の一部。

構造に着目して、画期的な疲労特性を示す鉄鋼を見出しました。特に「層状形態を要素に含む階層性原子集団の金属マイクロ構造」によって、鉄鋼が動物の骨のような粘りのある壊れ方をするため、き裂伝ぱが抑えられて疲労寿命が格段に延びることを明らかにしました。本成果は、応用面実用面への貢献はもちろん、疲労などの力学特性に優れた金属材料の開発に貢献する金属物理学、また鋭いき裂先端という特殊な力学状態を解析する破壊力学の両学問分野にとっても新展開をもたらすものとして期待されます。

\*\*\*\*\*

金属疲労研究、金属疲労き裂研究にはまだまだ新天地があることを示せたと認識している。2013年の九州大学異動以降に感じていることは、材料工学と機械工学の連携の重要性である。図4の好奇心の円環で述べたように領域間での情報交換と連携が大切なように、工学の中でも連携が重要と思っている。

準安定ラメラ組織を持つTRIP マルエージ鋼の成果は、この連携によってマイクロ組織制御による疲労特性改善の指針の一例を示したものであった。材料工学の知見に基づき、マイクロ組織を疲労特性改善に活用するためには、き裂閉口現象という力学現象を理解し、それらが部材形状、外部環境によって如何に変化するかを理解することが鍵であった。ある条件で安全であったものが他の条件で同じく安全であるとは限らず、この危険性の把握にはマクロな力学解析の助けが不可欠

である。一方、機械工学の観点においても、マイクロ組織設計の理解に基づくマクロ構造設計を志すことで、より精緻な材料選定と品質管理、より確かな構造設計を可能とする。特に、水素環境など経験値の低い環境で構造設計をする場合、マイクロ組織の理解がリスクの査定に重要な価値を生み出す。本件のように、力学とマイクロ組織学の連携で見いだされた材料特性向上を好例として、種々の環境における材料開発および安全構造設計が今後も継続される中で、機械工学と材料工学の真の連携が実現達成されると確信している。

## 7. おわりに

令和元年6月1日水曜会大会講演では津崎が関わった鉄鋼に関する研究プロジェクトのいくつかを紹介しながら、『鉄鋼研究は楽しい』、『鉄鋼研究には重要課題が満載』というメッセージを伝えようと試みた。講演では3つの研究プロジェクトの研究成果概要とともに、その時代の鉄鋼研究の空気と私の思いについて話をさせていただいた。本稿では、特に当時の鉄鋼研究の環境と空気そして私の思いを改めて記させていただいた。思いが伝われば幸いである。

おわりに講演最後にお示した昭和62年金属系教室の新年会集合写真を図6に示す。若かりし自分と、今の自分より若い恩師の先生方がそこにある。水曜会の継続発展を祈念する。



図6 昭和62年（1987年）金属系教室の新年会集合写真

## 談 話 室

## 観測，理論，そして実験

福 山 英 一\*

## Observation, Theory and Experiments

by Eiichi FUKUYAMA

## 1. はじめに

私こと、平成31年4月に石田毅教授の後任として社会基盤工学専攻資源工学講座地殻開発工学分野の教授に着任しました。私の資源工学との“直接的な”関わりは、大学4回生まで遡らなければなりません。当時、京都大学理学部応用地球物理学教室に配属され、常時微動の解析を研究テーマとして与えられ、建設途上の洛西ニュータウンで常時微動データを取得しスペクトル解析をしてモデル化を行なったのが、私の卒業論文でした。その後、修士課程は京都大学防災研究所の地震動部門に在籍しました。4回生の時に発生した日本海中部地震の気象庁1倍強震計の紙記録のコピーを測候所を回って集め、デジタル化してモデル計算を行ったのが、修士論文でした。博士課程に進んだところで、科学技術庁国立防災科学技術センター（現 国立研究開発法人防災科学技術研究所）で研究者の募集があり、運良く就職することができました。

防災科学技術研究所では、火山関係の部署に配属になりました。火山はイベントが起こるまでは退屈極まりないという話を伺っていたのですが、就職するやいなや、伊豆大島の活動が活発になり、翌年の3月にはこれまで例をみない割れ目噴火により全島避難という大イベントに関わることになりました。火山観測の仕事しながら、地震の震源過程の研究を細々と続け、京都大学で論文博士（理学）を取得することができました。このころから、研究業務の軸足が地震観測に移っていきました。火山観測や地震観測に共通することですが、いい研究をするためにはいいデータを取ることです。防災科学技術研究所では、その信念のもと、

観測機器（地震計や傾斜計、ひずみ計）は、井戸を掘削して井戸の底に設置してきました。当然のことながら、私の仕事は、井戸を掘り観測機器を設置することが主となりました。当時、地震や火山観測のために井戸を掘って観測機器を設置してくれる専門業者があらうはずもなく、資源開発をされている業者の方々とのお付き合いが始まりました。「孔井の傾斜は3度以内」とか、「ケーシングのモルタルは孔口まで上がってこないダメ」とか、地質状態によってはかなり厳しい仕様を課しての仕事で、付き合っていた業者は、多くの経験（失敗？）を積んでもらい、技術レベルの向上が著しかったようでした。そうこうしているうちに、観測帯域の広帯域化のため大型の観測機器の設置を手がけるようになり、井戸ではなく坑道を掘削して、山の直下に観測機器を設置するという仕事を行いました。この仕事を通して、地下水の影響の大きさを学びました。横孔が地下水脈に当たると、それは大変で、しかも、観測データが著しく悪くなることを身を以て体験しました。

そうこうしているうちに、野外観測から得られるデータの解釈のためには、その背景理論を構築し、モデルに基づいた解釈を行う必要があることを理解して来まして、理論構築の研究をおこなうため、科学技術庁長期留学制度を使って、フランスのパリ地球物理研究所（Institut de Physique du Globe de Paris）に visiting researcher として1年間滞在しました。その間、Raul Madariaga 教授とともに、3次元媒質中のクラックの進展の問題に関する理論研究を行いました。その研究を通して、観測データからだけでは地震の発生を理解できないことを確信し、地震発生時の in-situ なデータが得られない以上、実験データで代替する必要があるという結論に至りました。実験すべきターゲットは、

\*京都大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻 教授

岩石摩擦の性質です。地震発生を再現するためには、「断層形状」、「断層に働く応力」、そして「断層面の摩擦」の3つの要素を知る必要があります。前者2つは地震観測データからの推定が可能ですが、最後の断層摩擦に関しては、観測データからの推定が極めて難しく、実験による推定をする必要があります。

これまでの実験の多くは、小サイズの岩石試料を用いて現場環境に近い温度圧力条件を再現した環境で行われてきました。近年、岩石試料のサイズ依存性とすべり伝播効果の評価が問題となっています。小サイズの試料を用いた実験で得られた摩擦の性質が、大スケールの現象に適用できるかどうかは、そう簡単ではありません。また、すべりの伝播に関しては、実測による研究はあまり行われておらず、地震波を用いたインバージョン法による推定や、理論研究が主に行われてきました。

そこで、防災科学技術研究所において大型岩石試料を用いた摩擦実験を計画し、2012年より実施してきました。先行研究として、米国地質調査所が所有する岩石摩擦試験機がありました。米国地質調査所は、1.5m四方の花崗岩を対角線で切り、長さ2mのすべり面を作って摩擦実験をしていました。先行研究の問題点は、加圧にフラットジャッキを用いていたためすべり量をあまり大きくできないことと、岩石を横置きにしていたため、すべり面の観察が容易ではないということでした。防災科学技術研究所は15m四方の加振台を有する大型震動台を所有しており、最大変位40cmの大型アクチュエータを利用して大変位を出すことが可能です。そこで、この大型震動台上に岩石摩擦試験機を構築し、摩擦実験を行いました。また、すべり面を容易に観察できるよう試験機の設計を行いました。用いた岩石は、その強度と供給の安定性を考慮してインドのタミル地方産の変斑礫岩を用いました。世間では、黒御影として墓石の原料として流通しています。斑礫岩は海洋地殻の代表的な構成岩石です。

大型岩石試料の摩擦実験をするため、接触面の整形に一番神経を使いました。2つの岩石試料がぴったりと接触していなければ、摩擦はその接触面積によって変わることになります。全面が接触するようになるまで岩石試料を削っていく必要がありますが、その作業は、実験する現場ではほぼ不可能ですので、事前に2つの岩石が密着するように接触面を整形しておく必要があります。これは、大型平面研削盤を持っている石材店を探すことで解決しました。当時、大型平面研削盤は日本国内に8台存在していて、そのうちの1台が岩石やセラミックスの加工に用いられていました（つまり、水を使って研削できる）。その制約で、岩石試料の購入元はおのずと決まってしまいました。

この一連の実験において最も印象に残っている出来事は、やはり初回の実験でした。この実験前には、どのような摩擦実験になるか様々な想像を働かせていましたが、現実には、その想像をはるかに超えたものでした。長さ1.5mある接触面を10 $\mu$ m以下の精度で加工した岩石を重ね合わせて摩擦実験をするのですから、面上に削れたり削れなかったりといった空間的な不均質が出来るとは夢にも思わず、均一に磨耗していくものだとばかり思っていました。しかしながら、最初の実験直後に接触面を観察すると、接触面には(たった)15本の線状痕が現れただけで、その周りに紡錘形の磨耗物が生成されていました。そのほかの部分はツルツルと磨かれていました。後の詳細なデータの解析で判明するのですが、この空間的な不均質こそが、大型岩石試料を使った場合の特徴であり、スケーリングによって小試料の実験結果を大試料に適用する際に考慮すべき性質であることがわかりました。

## 2. インバージョンとの出会い

インバージョン (Inversion) という言葉は、今では普通に使われますが、1980年代においては、その理論構築が盛んに行われていました。逆問題を解くことに

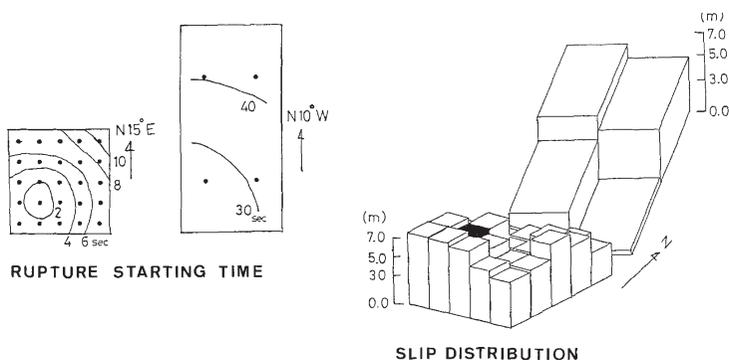


図1 Fukuyama & Irikura<sup>3)</sup>により推定された1983年日本海中部地震のすべりモデル。

より観測データからモデルパラメータを推定する際には、問題が ill-posed であることが多く、そのままでは最適な解が求められないことが多々ありました。そこで、先見的な情報を導入して、解を求める手法が発展してきました<sup>1)</sup>。この場合、モデルパラメータの自由度を客観的に決定する必要がありますが、そのために AIC (Akaike Information Criteria) やベイズ統計が用いられるようになりました<sup>2)</sup>。この手法を用いることにより、断層すべりの時間発展を地震波形データから推定できるようになりました<sup>3,4)</sup>。(図1)

### 3. クラックとの出会い

大地震のすべり分布を求める研究をしているうちに、なぜ、そのようなすべり発展をしていくのかに興味が出てきて、クラック理論というものの存在を知りました。断層のすべり進展は理論的に表現できるもので、そのためには、断層摩擦則を決める必要があることがわかりました。断層面上での応力変化と食違い変位が積分方程式によって一意に表現でき、断層摩擦構成則と連立して解くことにより、断層すべりの自発的破壊伝播を計算することができることがわかりました<sup>5,6)</sup>。この計算プログラムを書いて、実際の地震の再現ができるようになりました。そこで、1891年濃尾地震、1995年兵庫県南部地震、2000年鳥取県西部地震など内陸の大地震の再現<sup>7,8)</sup>をすることで、地震発生前に断層に働いている応力場を推定したりしました。しかしながら、断層面上での摩擦構成則パラメータは、この方法をもちたとしても仮定するしかなく、何らかの方法で別途推定する必要があることがわかりました。(図2)

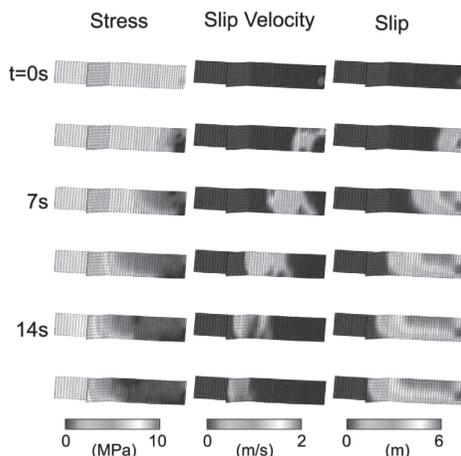


図2 Fukuyama & Mikumo<sup>7)</sup>による1891年濃尾地震のすべり過程のクラックモデルによる再現。

### 4. 岩石摩擦実験との出会い

岩石摩擦実験は、大学院時代から興味があったテーマでしたが、実験装置と研究資金が絡む研究ですのでハードルが高く、長いこと手を出せずにおりました。防災科研においてクラックシミュレーション研究が一段落したおり、岩石摩擦実験で博士号を取得した研究者をポスドクとして雇用する機会を得ました。最初の仕事は、高速剪断摩擦試験機を構築し高速摩擦に関する研究を行うことでした。当時、回転式高速摩擦試験機は世界中に数えるほどしかありませんでしたが、いずれの試験機も多目的利用を想定していたため、データの精度が上がりませんでした。そこで、防災科研で構築する試験機のターゲットは、用途は限られるが安定したデータが得られる試験機の構築を目指しました。この装置により、中速域 (~mm/s) のすべり速度においては、摩擦係数が一定せずにつらつく現象があることを発見しました<sup>9)</sup>。この現象は、実験装置の低強度に起因するものではなく、岩石の磨耗の性質によることを見出しました<sup>10)</sup>。(図3)

高速剪断摩擦装置は円筒試料を用い、同じ場所がなんどもすべることにより長いすべり距離を実現しているため、摩擦すべりのもう一つの特徴である破壊伝播の影響を調べることが出来ませんでした。さらに、室内実験と自然界の現象をつなぐためには、サイズ依存性の問題を調べるのが不可欠です。そこで、大変位を大型岩石試料で実現し、摩擦構成法則のサイズ依存性を調べることを目的として、大型2軸岩石摩擦試験機を構築しました。大型摩擦試験機構築の最大の問題は、大変位をどのようにして実現するかです。油圧によって、大型の岩石を動かすためには大きな力が必要です。しかしながら、防災科研には、これらの条件を満たす油圧源があることがわかりました。防災科研は大型震動台を所有しており、そのシステムをうまく利用してシステムを構築すれば、大型岩石摩擦試験機を実現できることがわかったのです。

この実験装置を用いた実験データの解析により、岩石摩擦のスケール依存性のメカニズムを報告することができました<sup>11)</sup>。さらに、破壊伝播の詳細な測定により、inter-sonic rupture (縦波と横波の間の速度で伝わる破壊伝播)の際の cohesive zone (破壊先端の非弾性領域)の長さの破壊伝播依存性を解明<sup>12)</sup>したり、載荷速度によって摩擦則が変化する性質があることを解明したり<sup>13)</sup>することができました。(図4)

今後、スケール依存性の研究をさらに推し進めるため、10m級の岩石試料を用いた岩石実験を、兵庫県三

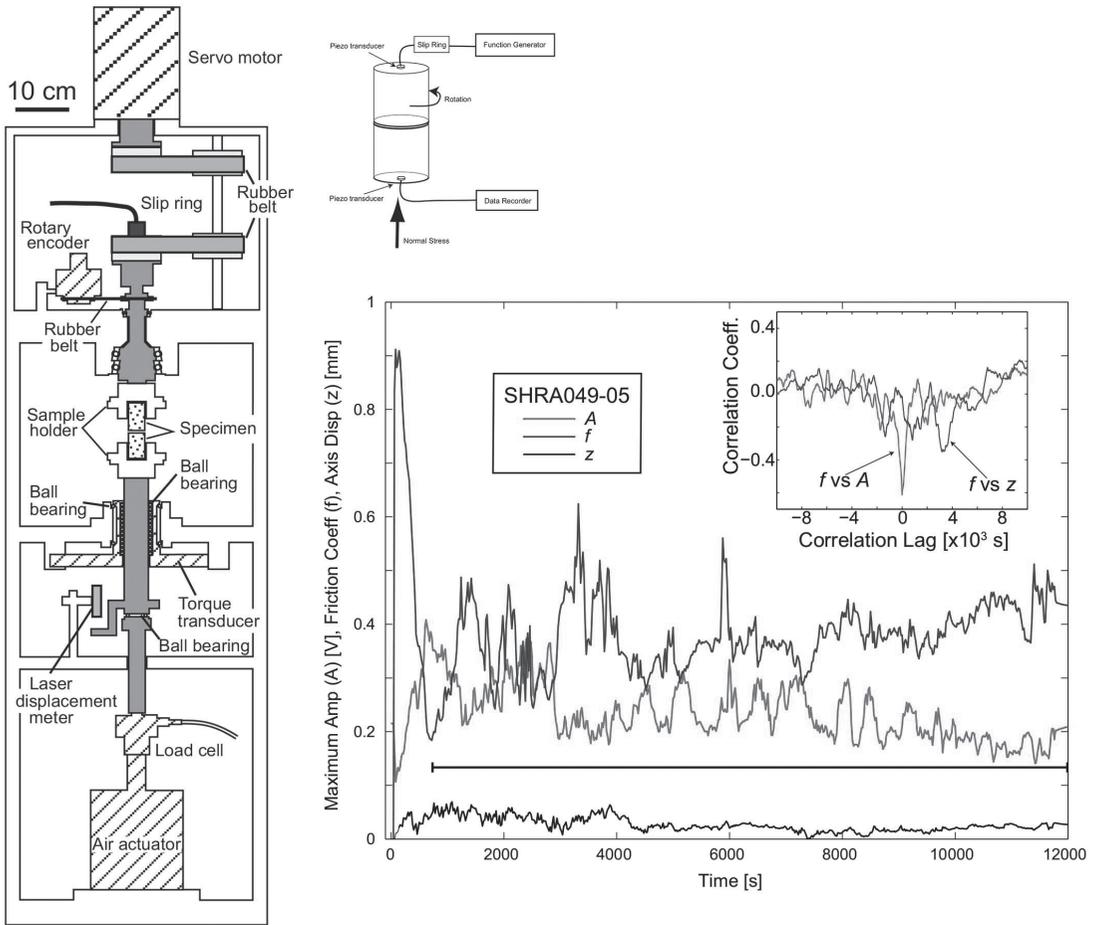


図3 Fukuyama et al.<sup>10)</sup>による高速剪断摩擦試験機(左)を用いてすべり面を透過する波の振幅と摩擦係数の比較(右). 逆相関の関係が認められる.

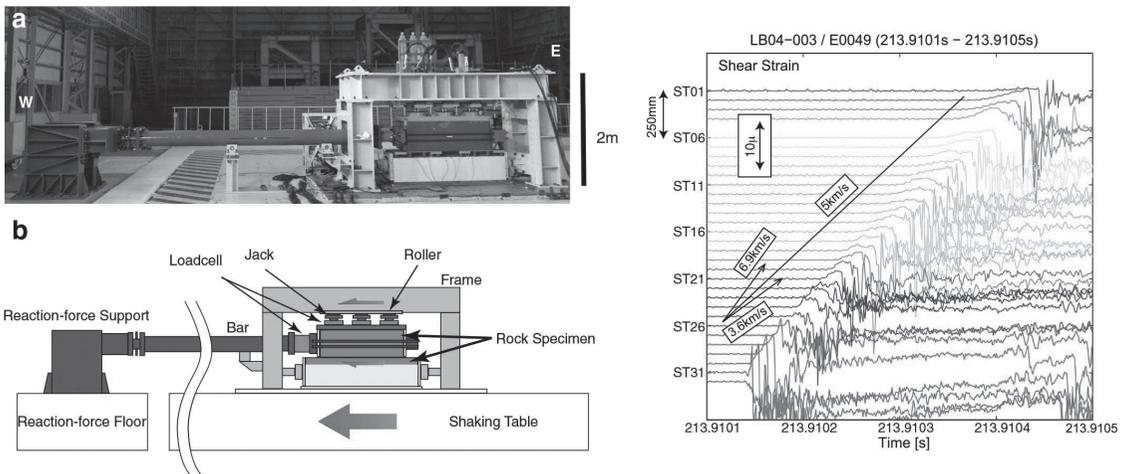


図4 Fukuyama et al.<sup>12)</sup>で用いられた大型2軸剪断摩擦試験機(左)とひずみ計アレイによって得られた擬似地震の破壊伝播(右).

木市にある防災科研所有の3次元大型震動台を用いた実験設備を構築し、実施を計画している。10m級の実験より、試料サイズが $10^{-2}$ mから $10^2$ mと3オーダーによる試験が可能になり、より精度の良いスケール依存法則の確立と、実験室データを自然界スケールに適用する際の指針の確立を目指したいと思います。

## 5. 最 後 に

これから資源工学に関する教育研究に携わることとなります。幸いにして色々な道具は持ち合わせておりますので、その道具をうまく用いて、資源工学の研究・教育の推進に少しでも貢献できればと思います。今後ともよろしく願いいたします。

## 参 考 文 献

- 1) Jackson, D. D. and M. Matsu'ura: J. Geophys. Res., **90**, [B1], 581-591, (1985).
- 2) Yabuki, T. and M. Matsu'ura: Geophys. J. Int., **109**, [2], 363-375, (1992).
- 3) Fukuyama, E. and K. Irikura: Bull. Seismol. Soc. Am., **76**, [6], 1623-1640, (1986).
- 4) Fukuyama, E. and K. Irikura: Geophys. J. Int., **99**, [3], 711-722, (1989).
- 5) Fukuyama, E. and R. Madariaga: Bull. Seismol. Soc. Am., **85**, [2], 614-628, (1995).
- 6) Fukuyama, E. and R. Madariaga: Bull. Seismol. Soc. Am., **88**, [1], 1-17, (1998).
- 7) Fukuyama, E. and T. Mikumo: Bull. Seismol. Soc. Am., **96**, [4A], 1257-1266, (2006).
- 8) Fukuyama, E.: International Geophys., **94**, 269-283, 2009.
- 9) Mizoguchi, K. and E. Fukuyama: Int. J. Rock Mech. Min. Sci., **47**, [8], 1363-1371, (2010).
- 10) Fukuyama, E. et al.: Pure Appl. Geophys., **175**, [2], 611-631, (2018).
- 11) Yamashita, F. et al.: Nature, **528**, [7581], 254-257, (2015).
- 12) Fukuyama, E. et al.: J. Seismol., **20**, [4], 1207-1215, (2016).
- 13) Xu, S. et al.: Tectonophysics., **733**, 209-231, (2018).

## 談 話 室

地球資源に関わる地殻ダイナミクスの理解を目指して：  
地球観測データを用いたアプローチ

石 塚 師 也\*

Toward Understanding Crustal Dynamics Related to Earth Resources:  
Approaches Based on Earth Observation Data

by Kazuya ISHITSUKA

## 1. はじめに

2019年1月1日に地球資源システム分野の助教に就任をしました石塚師也と申します。初めに、本稿の執筆の機会を頂きまして、関係各位に感謝申し上げます。本稿では、私の経歴とともにこれまでの研究について、紹介をさせて頂きたいと思います。私は、2010年3月に地球工学科資源コースを卒業し、2012年3月および2015年3月に工学研究科都市社会工学専攻の修士課程および博士後期課程を卒業しました。その後、公益財団法人深田地質研究所および北海道大学大学院工学研究院環境循環システム部門での勤務を経て、本学に着任し、現在に至ります。

私はこれまでフィールドスケールで得られた地球観測データの解析とそれを用いた地下構造や物性の推定に関する研究を行ってきました。具体的には、地下水利用地域を対象として、人工衛星データを用いた地表変動の計測および、地熱開発地域を対象として、地球物理データを基にした機械学習による地下物性分布の推定等を行ってきました。また、これらの手法の高精度化にも携わってきました（例えば、Ishitsuka et al., 2014; Ishitsuka et al., 2016; Ishitsuka et al., 2017）。その中から、まず、タイ国バンコク平野による地下水利用に伴う地表変動と帯水層の特徴（Ishitsuka et al., 2013）および、2011年東北地方太平洋沖地震後の関東平野における地下水位変化に伴う地表変動（Ishitsuka et al., 2017）について紹介をしたいと思えます。これらの解析には、PS干渉SAR解析と呼ばれる技術を用いてきました（図1）（Ferretti, 2015）。この技術は、人工衛星に搭載されたレーダによるマイクロ波の送受信によ

って、同一地域における別時刻に取得された位相差を用いて、地表変動を推定する技術です。この技術では、合成開口処理と呼ばれる解析手法を用いて、地表においても空間的高解像度（数m～数10m間隔）で広域（数10km～数100km範囲）かつ周期的（数日～数週間）に地表の情報を得ることが可能となります。また、地表変動は、地下の力学的な状態や物性を反映して発生するため、地下の不均質性に対する理解を深めることが可能となると考えています。続いて、温度検層データとマグネトテルリク法によって得られた比抵抗を基にした葛根田地熱地域の温度分布推定事例の紹介を致します。地熱開発において、地下の温度は非常に重要な状態量ではありますが、直接的に計測されるのは坑井位置のみであるため、その他の様々な計測から間接的に温度分布を推定する必要があります。本稿では、ニューラルネットワークを用いた温度推定手法開発とその精度検証結果（Ishitsuka et al., 2017）について、紹介をさせて頂きます。

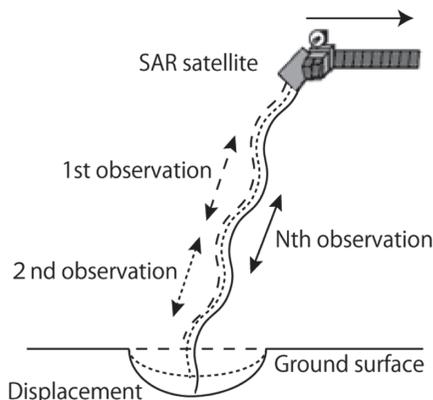


図1 PS干渉SAR解析の概念図。

\*京都大学大学院工学研究科都市社会工学専攻 助教

## 2. バンコク市の地表変動と帯水層の特性

世界中の大都市の多くは、地下水の利用に伴う地表変動の発生が課題となっています。地下水の利用に伴う地盤沈下の発生は広く知られていますが、一部の地域では、地下水利用量の減少や人工的な水圧入に伴う地下水位上昇および地表隆起が観測されつつあることはあまり知られていません。このような地下水位上昇に伴う地表の隆起は、帯水層内の間隙水圧が上昇し、帯水層骨格が膨張することにより、発生すると考えられます。そのため、地表隆起は、帯水層の水理構造や力学的特性を反映して発生すると考えられます。しかしながら、特に地下水利用量の現象に伴う自然発生的な地下水位上昇ならびに地盤隆起の発生するスケールや発生量は、観測データの不足のため、理解が十分であるとは言えません。

タイ国バンコク市は、アジアを代表する大都市ですが、地下水利用に伴う地盤沈下が先行研究により報告がされています。大きいところでは、累計1mもの地盤沈下が観測されています。一方、地下水利用量の規制に伴い、1997年より年間約1mもの地下水位の上昇がバンコク全土で観測されています。当研究では、2007年から2010年の約3年間の間に取得されたSARデータを用いて、PS干渉SAR解析を行い、バンコク市一帯の地表変動の推定を行いました。解析の結果、バンコク市の約250km<sup>2</sup>の範囲において年間数mmの地表隆起が発生していることが分かりました(図2)。地盤隆起が発生している地域で、地下水位上昇が観測されていることから、地下水位上昇に伴う地

表隆起現象だと解釈できます。また、自然発生的な地下水位上昇に伴い、このような大規模な範囲での地表変動が発生した事例はこれまでになく、自然発生的にこのような広域での隆起現象が発生し得ることを初めて示した研究となりました。

また、地表変動の時系列変化を見ると、地域ごとに異なる傾向が見られました(図2)。バンコク市西部では長期的な隆起のみが発生している一方で、バンコク市東部では長期的な隆起に加えて、年周期の地表変動が発生していることが分かりました。また、北東部や南部の一部の地域では、継続して沈下が発生していることが分かりました。この地表変動の地域性を理解するため、時系列地表変動を特徴的なパターンごとに分離することが有効です。時系列で得られた地表変動の周波数ごとに分離する方法や主成分分析を利用する方法等がありますが、当研究では、地表変動のメカニズムがある程度仮定できたため、時系列地表変動モデルを導入しました。具体的には、時系列の地表変動を1年周期の正弦関数および指数関数の和として、これらの関数に含まれる係数を推定することで、観測データに最も整合的なモデルを推定しました(例えば、図2A・2Bの線)。ここで、正弦波は季節性の地下水位変化に伴う地表変動、指数関数は間隙水圧変化に伴う弾性変形を仮定した場合の一般解として導入を行いました。

このような時系列地表変動のモデル化を行ったところ、季節性地表変動量は、主にバンコク市東部で発生していることが分かりました。また、バンコク市中央部では、季節性の地表変動が発生している地域とそう

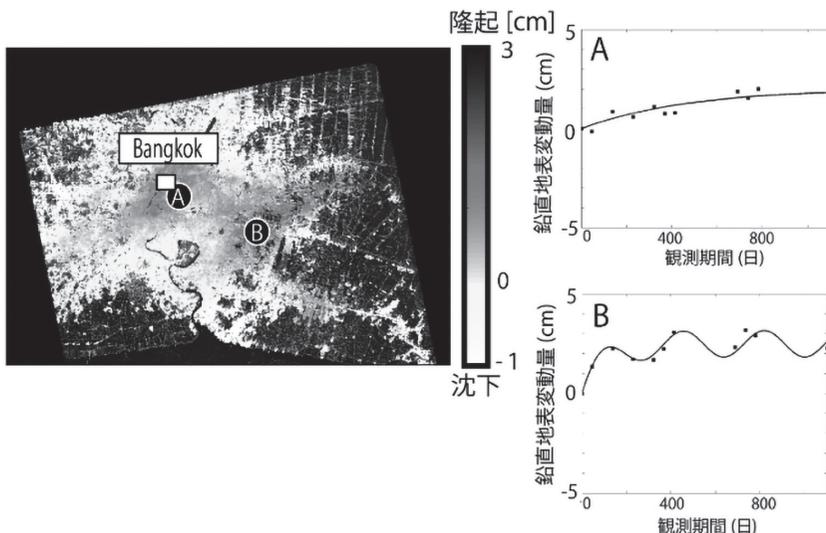


図2 PS干渉SAR解析によって推定されたバンコク市の2007年11月～2010年12月間の年間地表変動量(左)、時系列地表変動量(右)。

でない地域の境界があることが分かりました。この境界は、季節性の地下水が流出入している第一帯水層における水理境界に対応すると考えられます。また、指数関数でモデル化した長期的な隆起はバンコク市全土で発生していることが分かりました。一方で、長期的な隆起は、指数関数でモデル化したように、時間に伴い変動速度が減衰している傾向が表れていましたが、減衰の程度には地域性が見られました。具体的には、特にチャオプラヤ川流域で減衰が早く、それ以外の地域では、減衰が遅い傾向が表れました。これは、理論的な背景を考えた際に、帯水層の圧縮率や透水性の分布に起因すると考えられます。

地表変動が地下構造や物性に起因することは従来も指摘されてきましたが、このような手法を用いて空間的に密に地表変動を推定することで、初めて広域の傾向に関する議論が可能になります。当研究結果によって、本解析の有効性を示すことができたと考えています。

### 3. 地震後の地下水位変化に伴う地表変動

大規模な地震の発生時には広域にわたり地表変動が生じることが知られています。一方、地震に伴う局所的な応力状態の変化や、地震波による地殻の透水性の変化は、地下構造や地下物性に起因して発生すると考えられるため、局所的な地殻変動が発生する可能性が指摘されています。例えば、2011年東北地方太平洋沖地震に伴う地殻の弾性定数の不均質性に伴う局所的な地表変動や火山地域での局所的な沈下等が報告されています。このような局所的な地表変動は、地震に伴う地殻の歪分布の不均質性の評価につながります。さらには、地震発生時から発生後における油ガス田や地熱地域での生産量の変化に関係する可能性が指摘されています。しかしながら、これらの局所的な地表変動と地下構造や物性との関係に関する先行研究は限られた事例しかなく、今後の研究が求められています。

2011年3月11日に発生した2011年東北地方太平洋沖地震 (Mw 9.0) 後には、日本列島の広域にわたり地表変動が発生していることが報告されています。先行研究の多くでは、震源断層の余効滑りや粘弾性変形によって、これら地震後の地表変動が説明できることが示されています。一方、地震時には上述のような局所的な地表変動が報告されているものの、地震後の局所的な地表変動に着目した研究はほとんどありません。そのため、当研究では、まず、2005年から2015年の約10年間のGNSS座標値を用いて、関東地域の局所的な地表変動を推定し、地震前後の地表変動傾向の違いを調べました。さらに、PS干渉SAR解析により、より詳

細な地表変動分布のマッピングを行い、地下水位変化と比較を行うことで、そのメカニズムの推定を行いました。

まず、2005年から2010年の関東地方のGNSS観測点120点の座標値を用いて鉛直方向の地表変動を推定したところ、この期間における特徴的な地表変動傾向が見られました。例えば、関東平野北部と南東部での局所的な沈下や、相模トラフの沈み込みの影響と考えられる関東平野南部の隆起等です。一方、2011年以降の地表変動を推定したところ、関東平野南部において局所的な隆起が捉えられました。局所的な隆起は、2011年東北地方太平洋沖地震後に発生し、長軸短軸が約50km×30kmの楕円形を有しており、約3年間にわたり発生していることが分かりました。このような局所的な隆起は、2005年から2011年の期間には捉えられておらず、また隆起域において地下水圧入等は行われていないことから、2011年東北地方太平洋沖地震に伴い、自然発生的に起こったと考えられます。

さらに、より詳細な地表変動空間分布を得るため、PS干渉SAR解析により、GNSSで局所的な隆起が観測された関東平野南部の2011年4月から2012年11月間の年間地表変動量を推定しました。まず、PS干渉SAR解析で推定された地表変動をGNSS観測結果と比較を行ったところ、Root Mean Square Errorが3.0mmで地表変動が推定できていることが分かりました(図3)。さらに、局所的な隆起は、楕円形ではなく、数100m

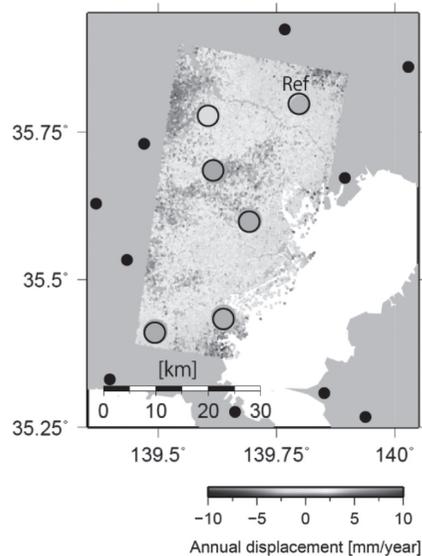


図3 PS干渉SAR解析によって得られた2011年4月から2012年11月間の関東平野南部の地表変動。点はGNSS観測点を表し、Refは地表変動の基準点(地表変動が0と仮定した地点)を表す。

から数 km の空間スケールを有する不規則な形状をしていることが明らかとなりました (図3)。

当研究で捉えた隆起域は、震源から約 400 km 離れており、震源断層による直接的な影響は考えにくく、加えて、地殻やマンツルの粘弾性変形によってもこのような局所的な空間スケールをもつ地表変動の発生は蓋然性が低いと考えられます。そのため、従来指摘されている地震後地殻変動とは異なるメカニズムでの地表変動が示唆されると考えました。特に、最も蓋然性が高い変動メカニズムは、地殻の透水性の変化と考えられます。実際に、地下水位との比較を行ったところ、局所的な隆起が発生している地域では、地下水位が上昇しており、地下水位変化に伴う隆起である可能性が考えられます。実験的な研究により、長波長の地震波がより浸透率を変化させやすいことが指摘されている (例えば、Manga et al., 2012) ことを鑑みると、関東平野南部は、周辺地域よりも基盤が深い位置 (約 2500 m - 3500 m) にあり、このような特徴的な地下構造によって、長周期地震波が増幅されたことが、先行研究により示唆されています。したがって、当研究で得られた特徴的な地表変動量の分布は、地下構造や地下水位変化を反映した2011年東北地方太平洋沖地震の影響と解釈することができました。

このように地下構造を反映していた局所的な地表変動が大地震により引き起こされることが、干渉 SAR 解析によって明らかになりつつあり、2016年熊本地震の際にも、阿蘇カルデラ内の温泉地域で発生した水平方向のブロック運動 (Tsuji et al., 2017) や地下深部の地殻流体移動に起因すると考えられる地盤沈下 (Yamada et al., 2019) を捉えました。これらの局所的な地表変動は全て地殻流体挙動に関係していると考えられ、自然現象の理解だけでなく、地震に伴う地下水や地熱資源、油ガス等の挙動の理解にも役立つと考えています。

#### 4. 地熱地域の温度分布推定

地熱地域の温度分布の把握は、地熱システムの理解や高温域の分布の把握のため重要です。温度は坑井の箇所においては、直接的に計測されており、それ以外の方法としては、震源分布の下限や変質鉱物の種類等によって、特定の地点での温度が推定することが可能です。しかしながら、計測された温度は離散的な位置における値であるため、計測量からフィールドスケールの温度分布を把握するための手法開発が求められます。

地層の比抵抗は、岩相や空隙率、含水率、温度に感度をもつ物理量です。例えば、温度の上昇に伴い、流体の粘性は低下するため、含水岩石の比抵抗は低下することが知られています。一方、水の比抵抗は、温度

の上昇とともに粘性の寄与が小さくなり、ある温度圧力条件以上では、温度とともに比抵抗が増加することが知られていますが、深部において塩分濃度の高い流体が存在していると考えられる場合、600℃程度の高温においても、温度の上昇に伴い、比抵抗は減少すると考えられます (Olhoef, 1981)。このような特性から、広域の比抵抗分布を用いて、温度を推定できる可能性が指摘されています。

既往研究では、神経細胞を模擬した数値アルゴリズムであるニューラルネットワークを用いて比抵抗と3次元座標から温度を推定する手法を開発し、成果を挙げつつあります (Spichak and Zakharova, 2012)。この手法では、まず坑井の位置において比抵抗と温度の関係をニューラルネットワークに学習させ、続いて、坑井が無い位置において、学習したニューラルネットワークを用いて、マグネトテルリク法で得られた広域の比抵抗分布から温度を推定する手法です。この手法は、フランスやアイスランドの地熱地域において適用されていますが、学習した坑井位置からの距離の増加とともに、温度の推定誤差が増加することが課題と言われていました。

そのため、私は既往研究を改良し、ニューラルクリギング (Koike et al., 2001) を用いて、比抵抗から温度を推定する手法を開発し、既往研究の課題の解決を目指しました。一般的なニューラルネットワークでは、計測された温度と推定された温度の二乗誤差を最小化するように、ネットワークを最適化しますが、ニューラルクリギングでは、二乗誤差に加えて、任意の2点間の温度の相関構造を表すバリオグラムの誤差を最小化することでネットワークを最適化します。そのため、バリオグラムとして表現される温度の空間分布も考慮して温度推定ができると考えられます。適用対象地域は、岩手県に位置する葛根田地熱地域とし、7本の坑井の温度データを用いました。当該地熱地域は、出力80 MWの発電所を有する地熱地域であり、WD-1aと呼ばれる坑井では深度3700 mにおいて、500℃もの高温が計測されています。なお、比抵抗データは、マグネトテルリク法を用いて推定された3次元比抵抗分布 (Yamaya et al., 2017) を用いました。

当研究では、ニューラルクリギングを用いる手法の特徴を調べるため、クロスバリデーションによる誤差検証を行い、ニューラルネットワークの結果と比較を行った。クロスバリデーションでは、1つの坑井の温度データを誤差検証用とし、それ以外の坑井の温度データを学習用データとして用いました。クロスバリデーションの結果、ニューラルクリギングを用いることで、推定値の誤差は6% - 87%減少しました。誤差の

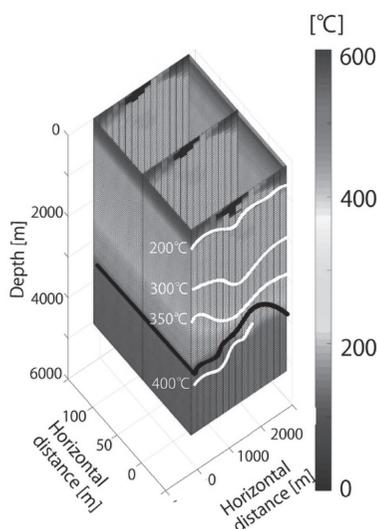


図4 推定された葛根田地域の温度分布.  $x, y, z, R, T$  はそれぞれ3次元位置, 比抵抗, 温度を表す. 葛根田地域において推定された3次元温度分布. 温度の線は観測により得られた値を表す.

減少が最も多かった坑井は、水平位置がそれ以外の坑井から最も離れた場所に位置している坑井でした。これは、学習データとして用いた坑井位置から離れた位置の推定誤差が既存手法の課題点でしたが、本研究によるアプローチにより、改善したと言えます。

開発した手法を用いて葛根田地域の3次元の温度分布の推定を行いました。先行研究によると、対象地域での温度は、2000 m深度で300℃を超え、花崗岩層との境界では大よそ350℃となることが知られています（例えば、Muraoka et al., 1998）。ニューラルクリギングを用いて開発した手法は、従来のニューラルネットワークによる手法より、先行研究に整合的な温度構造が推定されました（図4）。特に、学習に用いた坑井データから離れた位置における温度分布に改善が見られており、地質学的な観点からも開発した手法の有効性を示すことができたと考えています。

## 5. おわりに

私は上述の研究例のように、これまで、地球物理学的手法を用いて観測したデータの解析を行うとともに、地下物性の不均質性の解明を行ってきました。地球工学が対象とするフィールドでは、それぞれの地下構造や地下物性の不均質性に伴い、地殻の変形や地殻流体の挙動が生じます。このような地殻でのダイナミクスの理解を目指して、研究を進めてきましたが、より深い理解のためには、様々な観点からの議論が重要

となります。これから、本学において、これまでの研究を発展させるとともに、関連する分野を広く学び、新しい研究にも挑戦していきたいと考えています。そして、本学の教育に少しでも貢献できるよう、邁進してまいります。今後ともご指導を賜れますよう、何卒よろしくお願い申し上げます。

## 参考文献

- Ishitsuka, K., Fukushima, Y., Tsuji, T., Yamada, Y., Matsuoka, T., & Giao, P. H. : Natural surface rebound of the Bangkok plain and aquifer characterization by persistent scatterer interferometry, *Geochem. Geophys. Geosys.*, 15(4), 965-974, (2014).
- Ishitsuka, K., Tamura, M., & Matsuoka, T. : Equivalent stacking of polarimetric synthetic aperture radar interferograms based on analysis of persistent and distributed scatterers, *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.*, 11(8), 1360-1364, (2014).
- Ishitsuka, K., Tsuji, T., & Matsuoka, T. : Pixel-based interferometric pair selection in InSAR time-series analysis with baseline criteria, *Remote Sensing Letters*, 7(7), 711-720, (2016).
- Ishitsuka, K., Matsuoka, T., & Tamura, M. : Persistent scatterer selection incorporating polarimetric SAR interferograms based on maximum likelihood theory, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 55(1), 38-50, (2016).
- Ishitsuka, K., Matsuoka, T., Nishimura, T., Tsuji, T. & ElGharbawi, T. : Ground uplift related to permeability enhancement following the 2011 Tohoku earthquake in the Kanto plain, Japan, *Earth Planets Space*, 69:81, (2017).
- Yamada, W., Ishitsuka, K., Mogi, T., & Utsugi, M. : Surface displacements of Aso volcano after the 2016 Kumamoto earthquake based on SAR interferometry; implications for dynamic triggering of earthquake-volcano interactions, *Geophysical Journal International*, 218, 755-761, (2019).
- Tsuji, T., Ishibashi, J., Ishitsuka, K., & Kamata, R. : Horizontal sliding of kilometer-scale hot spring area during the 2016 Kumamoto earthquake, *Scientific Report*, 7:42947, (2017).
- Ishitsuka, K., Mogi, T., Sugano, K., Yamaya, Y., Uchida, T. & Kajiwar, T. : Resistivity-based temperature estimation of the Kakkonda geothermal field, Japan, using a neural network and neural kriging, *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.*, 15(8), 1154-1158, (2017).
- Ferretti, A. : Satellite InSAR data: Reservoir monitoring from space, European Association of Geoscientists and Engineers, EAGE Publications bv, (2014)
- Manga, M., Beresnev, I., Brodsky, E. E., Elkhoury, J. E., Elsworth, D., Ingebristen, S. E., Mays, D. C., Wang, C-Y. : Change in permeability caused by transient stresses : field observations, experiments, and mechanisms, *Rev. Geophys.*, 50:RG2004, (2012).

- Koike, K., Matsuda, S., & Gu, B. : Evaluation of interpolation accuracy of neural kriging with application to temperature-distribution analysis”, *Math. Geol.*, 33, 421-448, (2001).
- Olhoeft, G. R. : Electrical properties of granite with implications for the lower crust, *J. Geophys. Res.*, 86, B2, 931-936, (1981).
- Spichak, V. V. & Zakharova, O. K. : The subsurface temperature assessment by means of an indirect electromagnetic geothermometer, *Geophysics*, 77, 4, 1-12, (2012).
- Yamaya, Y., Uchida, T., Ogawa, Y., & Mogi, T. : Organization of resistivity exploration data for development of deep geothermal systems – Reprocessing magnetotelluric data from the Kakkonda geothermal field, northeast Japan, *Proceedings of 39<sup>th</sup> NZ geothermal workshop*, Rotorua, 061, (2017).
- Muraoka, H., Uchida, T., Sasada, S., Yagi, M., Akaku, K., Sasaki, M., Yasukawa, K., Miyazaki, S., Doi, N., Saito, S., Sato, S., & Tanaka, S. : Deep geothermal resources survey program: igneous metamorphic and hydrothermal processes in a well encountering 500°C at 3729m depth, Kakkonda, Japan, *Geothermics*, 27, 5/6, 507-534, (1998).

## 談 話 室

SiC 単結晶の溶液成長法における  
溶融合金中の SiC の界面成長

鳴 海 大 翔\*

Interface Growth of SiC in High-temperature Alloy Solution  
During Solution Growth of SiC

by Taka NARUMI

## 1. はじめに

平成31年4月付けで、材料工学専攻先端材料機能学分野（安田秀幸教授）の助教に着任いたしました鳴海大翔（なるみたか）と申します。平成24年に東京大学工学部マテリアル工学科を卒業し、東京大学大学院工学系研究科マテリアル工学専攻に進学、東京大学生産技術研究所の吉川健准教授の指導を受け、平成30年3月に「SiC 単結晶の高温溶液中界面成長の物理化学」と題する論文により博士（工学）の学位を取得しました。同年4月からは名古屋大学ベンチャービジネスラボトリーにて中核的研究機関研究員として在籍（配属先は未来材料・システム研究所宇治原研究室）し、溶液成長法による大口径 SiC 単結晶の育成技術に関する研究開発に従事しました。また、複数の機能材料の結晶成長、合成プロセスにおける高温反応界面の諸現象を冶金学の観点からアプローチしてきました。今回、この場をお借りして、SiC 単結晶の溶液成長法に関して私が行ってきた研究を紹介させていただきます。

## 2. SiC 単結晶の製造プロセス

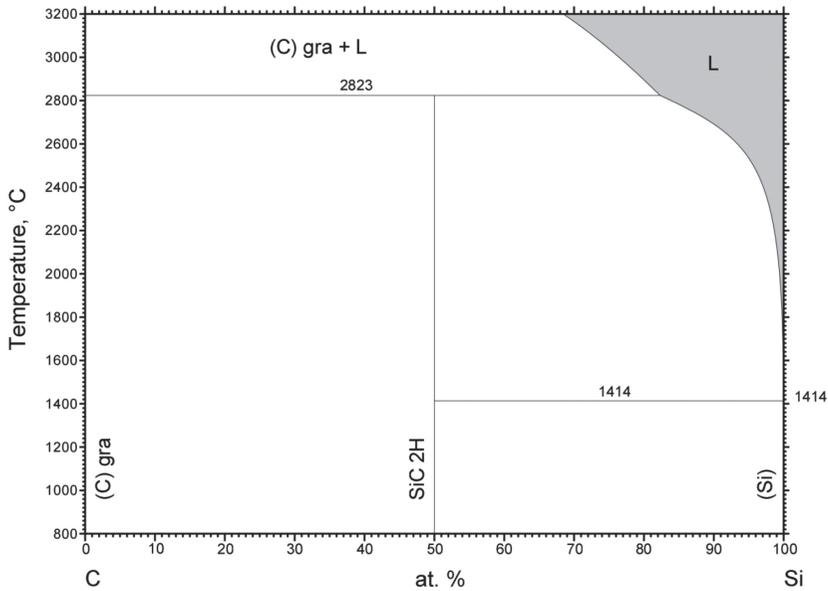
SiC は Si : C = 1 : 1 の化学量論組成を有する化合物で、隕石中に含まれることはありますが、地球上には殆ど存在しない人工結晶の一つです。硬度、フォノン伝導（高熱伝導性）、化学的安定、耐熱性が高く、研磨材や鉄鋼業の内張り耐火物等の材料として古くから工業的に広く用いられてきました。また、化学的な安定性を活かして、反応性の高いガスを用いる半導体製造装置内部の高温部材としても利用されています。最近では、SiC 多孔体を用いたディーゼルエンジンの微

粒子捕集フィルター、SiC/SiC コンポジットを用いた高級車のプレーキディスクや原子力発電の燃料棒容器の代替材料として応用あるいは研究開発が進められています。

半導体としての SiC は結晶多形（ポリタイプ）に応じて 2.23-3.26eV の広いバンドギャップを持ち、高い絶縁破壊電界強度を有することから、デバイスに通電した際の抵抗が Si よりも小さくなるため、省エネルギーデバイス用の基盤材料として注目されています。結晶学的には SiC は結晶多形現象（polytypism）を持つ代表的な結晶として知られており、正四面体を基本単位として c 軸方向に対する積層の構造が異なるポリタイプが 200 種以上存在します。このうち発生確率が高く応用上重要なのは 3C、4H、6H、15R-SiC です（最初の数字は積層方向の一周期中に含まれる Si-C 単位層の数を意味し、後の C、H、R は結晶系の頭文字（C：立方晶(cubic)、H：六方晶(hexagonal)、R：菱面体(Romboedral)を示します）。現在、各種ポリタイプのうち、高い絶縁破壊電界強度を示すことから 4H-SiC がパワー半導体デバイスの基盤材料として実用化されています。

図1に Si-C 系の状態図<sup>1)</sup>を示します。Si-C 系は包晶反応型の状態図を示し、3100 K で黒鉛と Si-C 溶融合金に分解するため、液相と固相の化学量論比が一致した融液成長法は適用できません。一般に SiC のバルク単結晶成長には昇華再結晶法が用いられています。図2に昇華再結晶法の模式図を示します。温度勾配のある準閉鎖空間内で粉末状の SiC 原料から昇華した Si と C からなる蒸気が不活性ガス中で反応しながら輸送され、原料より低温に制御された種結晶上に過飽和となった Si と C が(1)式に従って化合して結晶成長します。ガスが化学量論組成ではなく、また温度域によ

\*京都大学大学院工学研究科材料工学専攻 助教



© ASM International 2009. Diagram No. 102071

図1 Si-C 2元系状態図<sup>1)</sup>

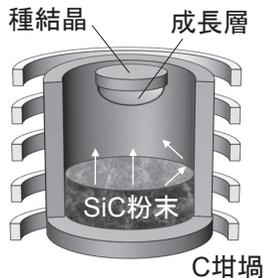


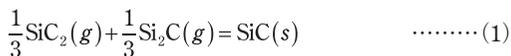
図2 昇華再結晶法の模式図

れています。現在は8インチサイズのウエハの開発が進められており、昇華再結晶法によるSiCバルク単結晶育成プロセスは既に実用化が開始されています。しかし、高温プロセスであるために、エネルギーコストの大幅な低減は困難であり、ウエハの低価格化には課題が残ります。また、デバイスチップをウエハ全面に作製した際、結晶欠陥由来の動作不良を引き起こし歩留まりが低下するため、結晶欠陥の低減は未だ課題となっています。

### 3. SiC 単結晶の溶液成長法

一般的に溶液成長法は、成長界面が熱平衡に近い状態で結晶が成長するため、転位欠陥の少ない高品質結晶が得られやすいことが特徴です。SiCの溶液成長法の歴史は昇華再結晶法と同じ程度古いものの、種結晶上に単結晶を得ることができず、昇華再結晶法の発展に伴いバルク結晶成長法としての研究は一度衰退しました。その後、昇華再結晶法ではマイクロパイプ欠陥がキラー欠陥となる問題があったことから溶液成長法によるバルク単結晶成長が再び注目され始めました。図3に育成手法の一つであるTSSG法 (Top-seeded solution growth) の概略を示します。SiCを飽和相とする組成のSi系溶融合金を炭素坩堝内で保持し、上部より低温に制御した黒鉛シャフトに貼り付けた種結晶を溶液に接触させてSiCの成長を得ます。溶液成長

ってポリタイプの発生頻度が異なるため、他のポリタイプが混在しない4H-SiCの単結晶を得るためには育成条件を細かく制御することが必要です。



昇華再結晶法では最大1-2mm/hの成長速度を得ることが可能ですが、結晶欠陥が導入され易く、成長速度と結晶品質がトレードオフの関係にあります。現在市販されている4H-SiC結晶の成長速度は200-500μm/h程度であり、2800K程度までの温度域にて育成されるのが一般的です。2010年に6インチサイズの口径のウエハの製造技術が開発され、デバイスのキラー欠陥であるマイクロパイプ欠陥の混入の完全抑制も達成さ

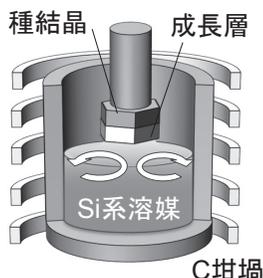


図3 溶液成長法の模式図

では坩堝と成長界面の温度差に起因する炭素溶解度の差を炭素過飽和濃度とし、これを大きくすることで高速成長を目指します。しかし、図1に示したSi-C系状態図で見られるように、溶融Si中の炭素溶解度は融点付近の温度では非常に小さいです。そのため、溶媒中の炭素溶解度を高めるため、2500 K付近の高温で、Siフラックスの蒸発を抑制するため高圧下での溶液成長が検討されましたが成長速度は300  $\mu\text{m/h}$ 以下でした<sup>2)</sup>。近年では溶液成長法を用いてより低温で高速成長を達成するため、SiにCr, Ti, Fe等の金属を添加した合金溶媒が使用されています。溶融Cr, Ti, Feはいずれも溶融Siと比較して炭素溶解度が高く、SiCを飽和相とし、炭素を高濃度に溶解可能な組成に溶媒を調整することでSiCの高速化が図られてきました。育成技術としてはTSSG法によって溶液上部に種結晶を保持する際に、溶液に適切なメニスカスを保ち拡大成長させる、メニスカス制御溶液成長法が開発されています<sup>3)</sup>。成長面の多結晶化を抑制して12 mmの長尺化、最大2 mm/hの高速化<sup>4)</sup>がそれぞれ独立して達成されており、溶液成長法はバルク単結晶の成長プロセスとしてのポテンシャルを持っていることが分かっています。

現在、溶液成長法の最重要課題とされているのは高速成長時の成長界面の形態制御(荒れの抑制)です。特に、ステップが東化すること(ステップパンチング)によって発生するマクロステップは、テラス幅を広げて、テラス上での異種ポリタイプを発生させます。また、マクロステップと他のドメインが競合して育成結晶中の溶液の噛み込み(包含物、インクルージョン)を引き起こすため、マクロステップの制御は必須です。また、溶液成長時の4H-SiC結晶の晶癖も重要な因子です。成長結晶の形状を凹面形状に制御してバルク結晶を育成する凹面成長法では、成長層の外周部に(1 $\bar{1}$ 02)ファセットが生じることで、連続的に4H-SiCの積層構造を持つステップを供給でき、異種ポリタイプの発生が抑制される<sup>5)</sup>とされています。実際の溶液成長法

では、上記で説明した育成技術を用いてはおりますが、成長界面の形態制御のために成長速度を100  $\mu\text{m/h}$ 程度かそれ以下に抑えているのが現状です。

そのため高品質4H-SiC単結晶の製造プロセスを実現するにあたって、溶液成長法において解決すべき課題は、高速成長と成長界面の平滑化の両立です。次項からこれらの課題について取り組んできた内容について説明します。

#### 4. Si系溶融合金中のSiC飽和炭素溶解度の熱力学予測<sup>6)</sup>

これまでSiCの溶液成長法では合金溶媒に遷移金属を添加して炭素溶解度を高める方向で高速が図られてきました。しかし、合金溶媒とSiCの相平衡の検討は十分とは言えませんでした。そこで、Si系合金の熱力学データベースを整備して相平衡関係を熱力学的に推算すること、SiCの溶液成長界面における成長速度の支配因子を明らかにして、高速成長に向けた組成設計の指針を構築することから始めました。

液相の混合ギブズエネルギー $\Delta G_{m,liq}$ は次の(2)式で表されます。

$$\Delta G_{m,liq} = \Delta G_{liq}^{id} + \Delta G_{liq}^{ex} \quad \dots\dots\dots (2)$$

液相の過剰ギブズエネルギー $\Delta G_{liq}^{ex}$ には(3)式で表されるRedlich-Kister型正則溶体モデルを用いました。ここでは液相中の過剰ギブズエネルギーを各基本二元系の寄与の和で表せるとしています。

$$\Delta G_{liq}^{ex} = X_{Si} X_M L_{Si-M} + X_C X_M L_{C-M} + X_C X_{Si} L_{C-Si} \\ L_{i-j,liq} = \sum_{m=0}^n \left\{ L_{i-j,liq}^m(T) (X_i - X_j)^m \right\} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$L_{i-j,liq}$ は準正則溶体パラメータと呼ばれ、成分*i-j*間の二元系の相互作用パラメータを表し、温度と組成の関数です。一例として、2073 KにおけるC-Cr-Si系、C-Ti-Si系、C-Fe-Si系の等温断面図<sup>6)</sup>を図4に示します。ただし、C-Ti-Si系のTi富化組成は再検討が必要であったため、SiC飽和組成側のみの相平衡関係に着目しました。C-Cr-Si系は比較的SiC飽和領域が大きく、SiCと黒鉛の両相飽和組成では炭素が25 mol%以上溶解することが予測されました。また、溶融CrとSiCが直接平衡することが予測されました。この相平衡関係を基に、Cr単一溶媒を用いた高速溶液成長の研究テーマに波及しました<sup>7)</sup>。C-Ti-Si系は高温で安定な化合物が多く、特にMAX相と呼ばれる $\text{Ti}_3\text{SiC}_2$ が高温まで安定なため、ほかの2つの等温断面図とは異なり、黒鉛と液相は平衡しません。C-Fe-Si系は液相はSiCまたは黒鉛と平衡することが予測されました。

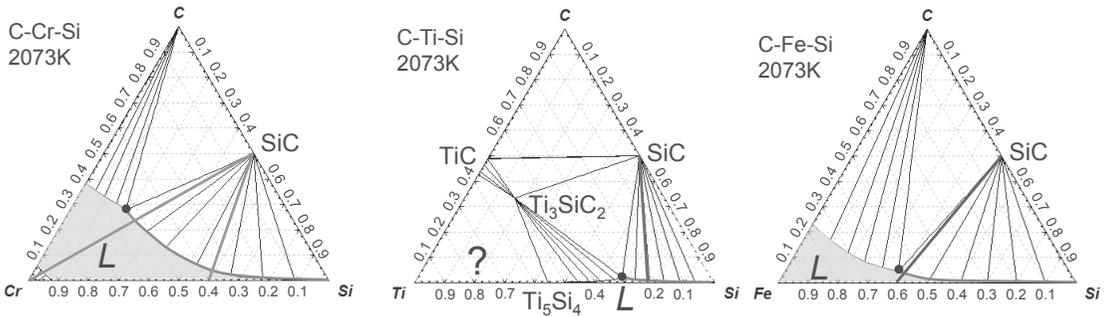


図4 C-Cr-Si系, C-Ti-Si系, C-Fe-Si系の等温断面図 (2073 K)

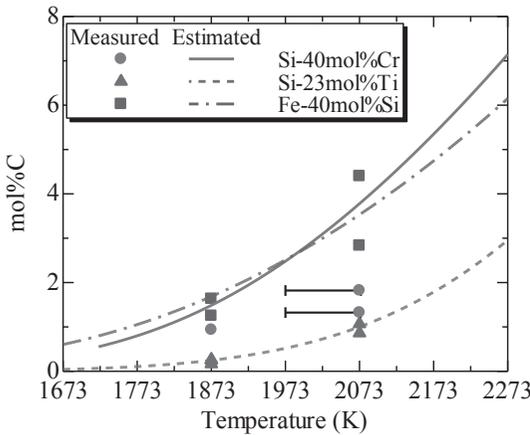


図5 Si-40mol%Cr 溶媒, Si-23mol%Ti 溶媒, Fe-40mol%Si 溶媒中 SiC 飽和炭素溶解度<sup>6)</sup>

実際に溶液成長法で高速成長が報告されている Si-40 mol%Cr 溶媒<sup>4)</sup>, Si-23 mol%Ti 溶媒<sup>8)</sup>, Fe-40 mol%Si 溶媒<sup>9)</sup> 中の SiC 飽和炭素溶解度の温度依存性<sup>6)</sup> を図 5 に示します。曲線で示した推算値と平衡実験から得られた測定値が、Si-23 mol%Ti 溶媒および Fe-40 mol%Si 溶媒中の SiC 飽和炭素溶解度は推算値と測定値が良い一致を示したのに対して、Si-40 mol%Cr 溶媒中の炭素溶解度は推算値が測定値よりも高く見積もられることが分かりました。これは、溶液系によって熱力学モデルの検討の余地があることを示しています。この結果を基に、Si-Cr 溶融合金中の SiC 飽和炭素溶解度が系統的に調査<sup>10)</sup> され、炭素溶解度が Henry 則に従うことが明らかにされました。その際、原子サイズの小さい溶質 C が Si-Cr 合金溶媒中の侵入型位置に配置すると考えて、Jacob らによって提案された置換型元素 (Si および Cr) と侵入型元素 (C) の結合の安定性を考慮する擬化学モデルを適用することで、C の置換型溶解を考える準正則溶体モデルよりも実験結果を良く再現できることが確認されました。

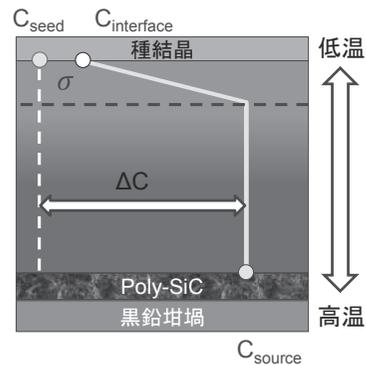


図6 SiC の溶液成長法における溶質炭素濃度分布の模式図

次に、溶液成長法の成長速度の支配因子を検討するにあたり素過程を考えます。素過程は大きく 3 つに分けられ、(1)原料の溶解反応過程、(2)溶液内の溶質の供給過程、(3)成長界面での界面反応過程があります。ここで、高温の溶解反応は速いため、(1)は成長速度に影響しないと仮定すると、(2)と(3)が成長速度を決定することが分かります。SiC の溶液成長における境界条件の模式図を図 6 に示します。SiC の溶液成長法では境界条件として、SiC 飽和組成の合金溶液を保持した黒鉛の坩堝壁に、溶液との平衡相の SiC が生成することを仮定し、それが溶解して溶媒に炭素が供給されると考えます。また、一般に SiC の溶液成長法では高周波誘導加熱を用いて加熱するため、電磁攪拌により溶液内の炭素濃度は高温の黒鉛坩堝から一定に維持されていると仮定します。固液界面での溶液のスリップが起きない状況では、成長界面近傍に境膜が発達し、境膜内の物質移動過程が生じます。その境膜内の物質移動過程と界面反応過程によって大きく成長速度の考え方が変わります。物質移動で律速される場合、Fick の第 1 法則により境膜内の溶質のフラックス  $N$  は(4)

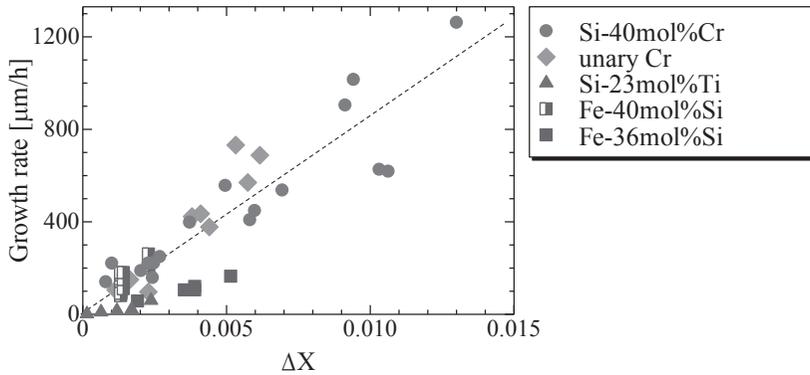


図7 種々の合金溶媒を用いた SiC の溶液成長法における成長速度と炭素過飽和濃度の関係<sup>6)</sup>

式で表されます。

$$N = \frac{D}{\delta} (C_{source} - C_{seed}) = \frac{k_m}{V_{mol}^{liq}} \Delta X_C \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 $D$  [ $m^2/s$ ] は溶質の拡散係数を表します。 $\delta$  [ $m$ ] は成長界面近傍に発達した境界膜の厚みを表します。 $k_m$  [ $m/s$ ] は物質移動係数を表します。 $C_{source}$  [ $mol/m^3$ ] と  $C_{seed}$  [ $mol/m^3$ ] は高温の原料界面における炭素濃度と低温の種結晶における炭素濃度を表します。 $V_{mol}^{liq}$  [ $m^3/mol$ ] は溶液のモル体積を表します。 $\Delta X_C$  はモル分率で表した炭素過飽和濃度を表します。物質移動律速の場合の成長速度  $R$  [ $m/s$ ] は、平滑な成長界面が 1 方向に移動すると仮定すると (5) 式で表されます。

$$R = k_m \frac{V_{mol}^{SiC}}{V_{mol}^{liq}} \Delta X_C \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここで  $V_{mol}^{SiC}$  [ $m^3/mol$ ] は SiC のモル体積を表します。結晶成長における界面反応は 2 次元核生成やスパイラルの活動に当たります。詳細は割愛しますが、その場合の成長速度の一般式は (1-11) 式で表されます。

$$R = K \sigma^n$$

$$\sigma = \frac{X_{interface} - X_{seed}}{X_{seed}} \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここで  $K$  [ $m/s$ ] はカイネティック係数を表します。 $X_{interface}$  は SiC/溶液界面で過飽和となった炭素濃度を示します。既報の種々の溶媒を用いた SiC 溶液成長法<sup>4), 7), 9), 11), 12)</sup> における成長時の温度差を用いて、成長速度と炭素過飽和濃度の関係<sup>6)</sup> を図 7 に示します。成長速度は炭素過飽和濃度に比例して増加する傾向が確認され、溶液成長法の共通の傾向として溶液中の溶質炭素の物質移動が支配因子であることが示されました。

実際の溶液成長法では、黒鉛坩堝と種結晶の温度差

を大きくする、全体の温度をより高くする、坩堝と種結晶を回転させる、フィンを浸漬して攪拌する、等で成長速度が向上することが既に報告されていましたが、これらは (5) 式の  $\Delta X_C$  を大きくする、境界膜厚み  $\delta$  を小さくして  $k_m$  を大きくする、と理解することができます。既に高速成長は技術的に方法論が出来ておりましたが、素過程を考慮して支配因子が決定されたことで育成条件を設計するための明確な指針を立てることが可能になります。

### 5. SiC 微粒子の粒成長を用いた安定晶癖の調査と分子動力学による原子レベルの界面構造<sup>13)</sup>

高速成長が達成されるようになると、成長界面が荒れて成長結晶中に異種ポリタイプや溶液包含物（インクルージョン）が混入する問題が顕在化してきました。SiC 溶液成長法は高速成長のポテンシャルあるにも関わらず、成長速度を低下させることで成長界面の荒れを回避しているのが現状です。最近の溶液成長法の研究開発では、市販ウエハと同等の抵抗値のウエハが凹面成長法<sup>5)</sup> を用いて育成されたバルク結晶で得られています<sup>14)</sup>。凹面成長法では成長層の外周部に (11̄02) ファセットが現れて、4H-SiC の連続成長が得られる<sup>15)</sup> とされています。そこで、SiC の溶液成長界面の現象を調査するために、Si 系溶融合金中の SiC 微粒子の粒成長の調査を行いました。

例として溶融 Si 中で粒成長した 3C-SiC, 4H-SiC, 6H-SiC 微粒子の典型的な形状の模式図を図 8 に示します。SiC のような 2 元系化合物の場合、結晶面に極性があるため次のようにミラー指数で表現します。3C-SiC の Si 極性面は {111} と表し、等価な結晶面は (111), (11̄1̄), (1̄11̄), (1̄1̄1) です。3C-SiC の C 極性面は {1̄1̄1̄} と表し、等価な結晶面は (1̄1̄1̄), (111̄), (111̄), (111̄) です。溶融 Si 中の 3C-SiC, 4H-SiC, 6H-SiC 微粒子が以

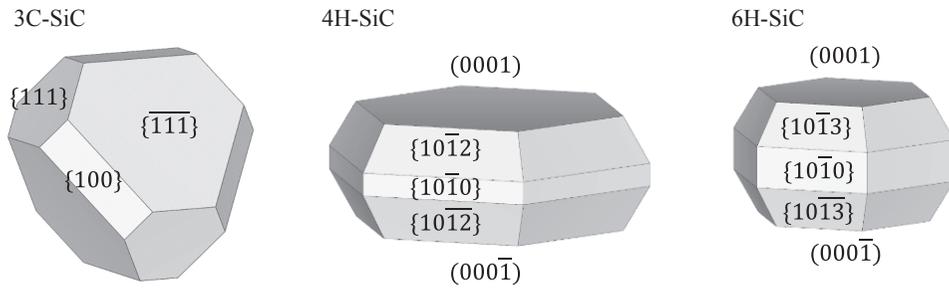


図8 溶融 Si 中の 3C-SiC, 4H-SiC, 6H-SiC 微粒子の晶癖の模式図<sup>13)</sup>

下の晶癖を示すことが分かりました。

3C-SiC : {111},  $\{\bar{1}\bar{1}\bar{1}\}$ , {100}

4H-SiC : (0001), (000 $\bar{1}$ ), {10 $\bar{1}$ 0}, {10 $\bar{1}$ 2}, {10 $\bar{1}$  $\bar{2}$ }

6H-SiC : (0001), (000 $\bar{1}$ ), {10 $\bar{1}$ 0}, {10 $\bar{1}$ 3}, {10 $\bar{1}$  $\bar{3}$ }

基底面である 3C-SiC の {111}, 4H-SiC および 6H-SiC の {0001} は、ほかの晶癖面よりも面積率が大きく、成長速度が小さいことが分かります。また、4H-SiC および 6H-SiC はともに六方晶系ですが、4H-SiC は面内方向に優先成長するのに対して、6H-SiC は等方的に成長する傾向にありました。溶液成長法による 4H-SiC のバルク成長でポリタイプの制御に重要と認識されている {10 $\bar{1}$  $\bar{2}$ } が安定晶癖として現れることが分かりました。そこで、結晶面毎の成長挙動を理解するために分子動力学シミュレーションを行いました。分子動力学は、系内の全ての原子の運動方程式を解き、運動の軌跡を追跡する決定論的計算手法です。運動方程式を(7)式に示します。

$$m_i \frac{d^2 r_i}{dt^2} = F_i \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここで  $m_i$ [kg] は  $i$  原子の質量を表します。  $r_i$  は  $i$  原子の位置ベクトルを表します。  $F_i$ [N] は  $i$  原子に働く力を表します。初期の原子の位置座標を与えて、原子間に働く力を適切に与えれば原子の運動を解析することができます。  $F_i$  を経験的なポテンシャル関数で近似する場合を古典分子動力学と呼びますが、本研究では古典分子動力学のみを取り扱うため、単に分子動力学と呼んでいます。高温の固液界面の成長ダイナミクスを計算するためには、高温における物性値の適合性が高いことが必要です。そこで、Si-C 2 元系の混合熱を計算して、既報のデータと比較しました。Si-C 溶液の混合熱  $\Delta H^{liq, Mix}$ [J/mol] は次の(8)式で表されます。

$$\Delta H^{liq, Mix} = H^{liq} - (X_C^{liq} H_C^{liq} + X_{Si}^{liq} H_{Si}^{liq}) \quad \dots\dots\dots (8)$$

ここで、  $H^{liq}$  と  $H_C^{liq}$ ,  $H_{Si}^{liq}$  はそれぞれ液相のエンタルピー、純 C 液相のエンタルピー、純 Si 液相のエンタ

ルピーを表します。  $X_C^{liq}$  と  $X_{Si}^{liq}$  はそれぞれ液相中の C と Si のモル分率を表します。液相に正則溶体を仮定すると混合熱は正則溶体パラメータを用いて次の(9)式で表されます。

$$\Delta H^{liq, Mix} = X_C^{liq} X_{Si}^{liq} \Omega_{C-Si}^{liq} \quad \dots\dots\dots (9)$$

既報の正則溶体パラメータ (8700 J/mol)<sup>16)</sup> から本研究と同じ組成を仮定して得られる混合熱を比較した際、全ての温度域で混合熱が正の値を示したため、Si と C が反発する (repulsive) ことを示しています。同様に混合熱が正の値を示すのは、 Tersoff\_94 ポテンシャル<sup>17)</sup> であることが分かりました。そこで、 Tersoff\_94 ポテンシャルを用いて SiC の溶液成長界面の解析を行いました。図8に示した一例のように種々の晶癖面の SiC と Si-50 mol% C 溶融合金を合体した固液界面セルを準備し、固液界面の移動量を解析することで成長速度を比較しました。

界面にきた原子がすべて即座に結晶に取り込まれると仮定する理想的な成長の場合には、成長速度は次の(10)式で表されます。

$$R_{(hkl)} = \frac{d_{(hkl)} A_{(hkl)} J_{crystallized}}{N_{(hkl)}} = \frac{d_{(hkl)} N_{crystallized}}{N_{(hkl)}} \quad \dots\dots\dots (10)$$

ここで、  $J_{crystallized}$ [1/m<sup>2</sup>·s] は単位面積、単位時間当たり結晶に取り込まれる原子数を表します。  $N_{crystallized}$ [1/s] は単位時間当たり結晶に取り込まれる原子数を表します。  $A_{(hkl)}$  は  $(hkl)$  の面積を表します。  $N_{(hkl)}$  は  $A_{(hkl)}$  に含まれる結晶面間隔内の原子数を表します。  $d_{(hkl)}$ [m] は結晶面間隔を表します。界面にきた原子がすべて即座に結晶に取り込まれると仮定した場合には、同じ成長条件であれば各結晶面で結晶に取り込まれる原子数は等しく、成長速度の異方性は結晶構造に由来する  $N_{(hkl)}$  と  $d_{(hkl)}$  でのみ表されるはずですが。

一例として 4H-SiC の {0001}, {10 $\bar{1}$ 0}, {10 $\bar{1}$ 2} を 3500 K にて 3000 ps 保持した際の各結晶面の成長速度を表1に示します。4H-SiC は {0001} の成長速度が最も小さ

表 1 分子動力学シミュレーションによる 4H-SiC の  $\{0001\}$ ,  $\{10\bar{1}0\}$ ,  $\{10\bar{1}2\}$  の界面成長の速度と結晶化原子数の解析結果<sup>13)</sup>

	4H-SiC		
	$\{0001\}$	$\{10\bar{1}0\}$	$\{10\bar{1}2\}$
$N_{3000ps}$	2582	4076	4595
$d_{(hkl)}$ [Å]	2.52	2.66	2.35
$N_{(hkl)}$	1152	1344	1152
$A_{(hkl)}$ [Å <sup>2</sup> ]	5048	5543	5389
$J_{3000ps}$	0.512	0.735	0.853
$d_{(hkl)}/N_{(hkl)}$	$2.18 \times 10^{-3}$	$1.98 \times 10^{-3}$	$2.04 \times 10^{-3}$
$R_{(hkl)}$ [m/s]	0.070	0.135	0.152

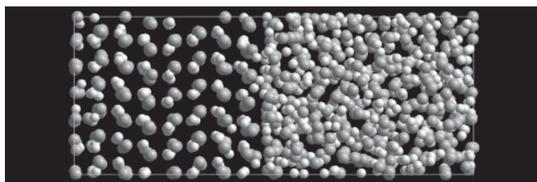


図 9 分子動力学シミュレーションで用いた SiC と Si-C 溶液の固液共存セル<sup>13)</sup> (界面の結晶方位は  $\{0001\}$ )

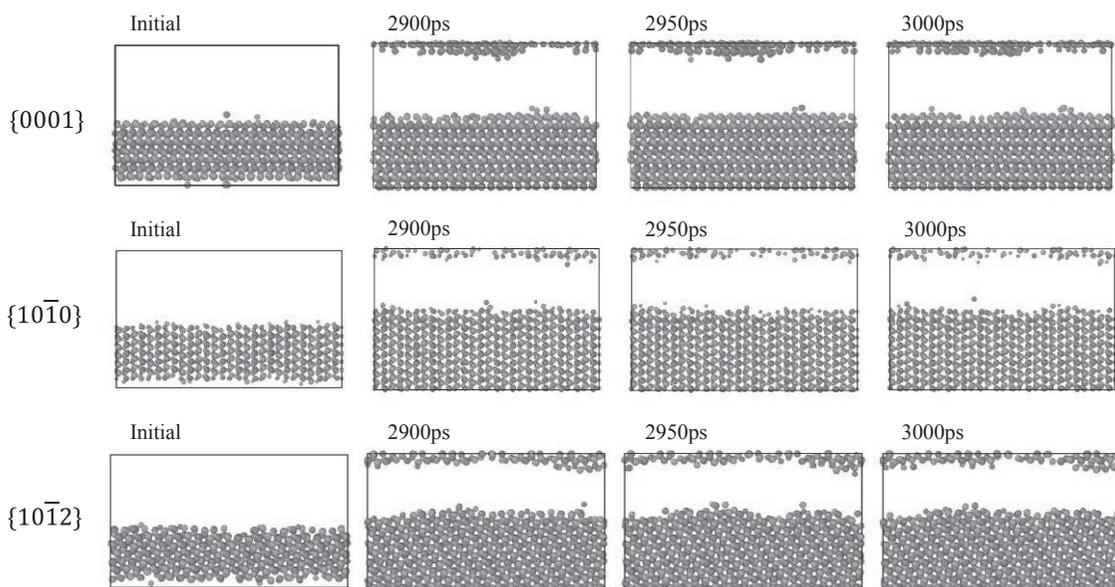


図 10 4H-SiC の  $\{0001\}$ ,  $\{10\bar{1}0\}$ ,  $\{10\bar{1}2\}$  の界面成長の分子動力学シミュレーション結果<sup>13)</sup>

く、次に  $\{10\bar{1}0\}$ ,  $\{10\bar{1}2\}$  は最も成長速度が大きく、分子動力学計算は粒成長の実験結果と相関があることが分かりました。また、結晶方位によって結晶に取り込まれる原子数が異なるため、界面にきた原子がすべて即座に結晶に取り込まれる理想的な成長ではなく、律速過程があることを示しています。計算条件を考慮すると界面で原子が結晶に取り込まれる界面成長過程の寄与があることが分かりました。そこで、各結晶面の成長モードを検討しました。4H-SiC の  $\{0001\}$ ,  $\{10\bar{1}0\}$ ,  $\{10\bar{1}2\}$  を 3500 K にて 3000 ps 保持した際の固液界面セルのスナップショットを図 9 に示します。ここでは、結晶 (固相) に相当する原子のみを表示しています。ここで、結晶 (固相) に相当する原子とは周囲に原子 4 個が正四面体位置に配位した状態の原子を指しま

す。各結晶面での成長過程を、50 ps 毎のスナップショットで示し、保持時間をスナップショット横に示しています。 $\{0001\}$  では始め平坦であった界面に結晶が付着して層状成長する様子が見られたのに対して、 $\{10\bar{1}0\}$  と  $\{10\bar{1}2\}$  は層状成長ではなく界面がラフな状態で成長が進行していることが分かりました。一般にラフな成長は付着成長様式で進行すると考えられます。したがって、各結晶面の成長モードが異なるために成長速度に差が生じて、晶癖が生じていることが分かりました。

溶液成長法による 4H-SiC のバルク単結晶を育成するには成長層の外周部に現れる  $\{10\bar{1}2\}$  ファセットを維持する必要があります。 $\{10\bar{1}2\}$  は晶癖として現れますが、層状成長する基底面よりも成長速度が大きくなる

傾向にあるため、結晶成長の進行に伴い $\{10\bar{1}2\}$ は消失する可能性があります。 $\{10\bar{1}2\}$ が消失すると別の多形の6H-SiCが発生することが報告されています<sup>15)</sup>。 $\{10\bar{1}2\}$ を維持するには、熱流動を制御して溶質Cの供給を調整することで成長速度を制御する必要があります。成長速度を向上する際には1次元的に溶質Cの供給を考えていましたが、成長結晶の形状を制御するには結晶周りの流れ、温度、溶質C分布の空間分布を制御することが必要であることが分かります。

## 6. おわりに

本稿では、SiC溶液成長法の界面成長に関して簡単に紹介させていただきました。私の研究では、結晶を取り巻く環境相の輸送現象の制御に加えて、成長界面における原子の挙動と界面反応過程を掌握して、高品質結晶を育成することを目指してきました。その研究で培った知識と技術を、鉄鋼・金属材料の凝固現象の理解と制御に展開して、先端材料機能学講座で新しい研究の方向性を示せるよう励んでまいります。今後、高温の反応界面に注目した研究を続けるにあたり、「界面とは何か？」を追求し、新しい学理構築に挑んでまいります。

SiCの溶液成長法は、日本国内の企業や大学、研究機関が中心となって近年成熟してきた結晶成長プロセスです。研究者同士の議論が盛んにおこなわれており、自分が研究している材料が実用に向かっていく様子を知ることができたのは、大学院生の私にはとても貴重な経験でした。また、整備した熱力学データベースが商用の結晶成長専門の熱流体シミュレーションソフトウェアに実装されていることを最近知りました。実際の溶液成長プロセス開発の現場で自分の研究成果が直接利用されていることは私のモチベーションになっております。今後も、産業界に貢献できるような研究も続けてまいります。

これから何卒ご指導ご鞭撻賜れたら幸いに存じます。

## 参 考 文 献

- 1) Carbon-Silicon Phase Diagram, ASM Alloy Phase Diagrams Database, P. Villars, editor-in-chief; H. Okamoto and K. Cenual, section editors; <http://www.asminternational.org>, ASM International, Materials Park, OH, 2016.
- 2) D. H. Hofmann and M. H. Muller, "Prospects of the use of liquid phase techniques for the growth of bulk silicon carbide crystals," *Mater. Sci. Eng. B*, vol. 61-62, no. 0, pp. 29-39, 1999.
- 3) H. Daikoku *et al.*, "Top-Seeded Solution Growth of 4H-SiC Bulk Crystal Using Si-Cr Based Melt," *Mater. Sci. Forum*, vol. 717-720, pp. 61-64, May 2012.
- 4) M. Kado *et al.*, "High-Speed Growth of 4H-SiC Single Crystal Using Si-Cr Based Melt," *Mater. Sci. Forum*, vol. 740-742, pp. 73-76, Jan. 2013.
- 5) H. Daikoku *et al.*, "Solution Growth on Concave Surface of 4H-SiC Crystal," *Cryst. Growth Des.*, vol. 16, no. 3, pp. 1256-1260, 2016.
- 6) T. Narumi *et al.*, "Thermodynamic evaluation of the C-Cr-Si, C-Ti-Si, and C-Fe-Si systems for rapid solution growth of SiC," *J. Cryst. Growth*, vol. 408, pp. 25-31, Dec. 2014.
- 7) R. Miyasaka, S. Kawanishi, T. Narumi, H. Sasaki, T. Yoshikawa, and M. Maeda, "Solution growth of silicon carbide using unary chromium solvent," *J. Cryst. Growth*, vol. 460, 2017.
- 8) K. Kusunoki *et al.*, "Solution Growth of SiC Crystal with High Growth Rate Using Accelerated Crucible Rotation Technique," *Mater. Sci. Forum*, vol. 527-529, pp. 119-122, Oct. 2006.
- 9) T. Yoshikawa, S. Kawanishi, and T. Tanaka, "Solution Growth of Silicon Carbide Using Fe-Si Solvent," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 49, no. 5, p. 051302, May 2010.
- 10) H. Daikoku, S. Kawanishi, and T. Yoshikawa, "Measurement and Thermodynamic Analysis of Carbon Solubility in Si-Cr Alloys at SiC Saturation," *Mater. Trans.*, vol. 58, no. 10, pp. 1434-1438, 2017.
- 11) K. Kusunoki *et al.*, "Crystalline Quality Evaluation of 6H-SiC Bulk Crystals Grown from Si-Ti-C Ternary Solution," *Mater. Sci. Forum*, vol. 483-485, pp. 13-16, May 2005.
- 12) S. Kawanishi, T. Yoshikawa, K. Morita, N. Okada, K. Kusunoki, and K. Kamei, "Solution growth behavior of SiC by a temperature difference method using Fe-Si solvent," *J. Cryst. Growth*, vol. 381, pp. 121-126, Oct. 2013.
- 13) T. Narumi, Y. Shibuta, and T. Yoshikawa, "Molecular dynamics simulation of interfacial growth of SiC from Si-C solution on different growth planes," *J. Cryst. Growth*, vol. 494, pp. 36-43, 2018.
- 14) K. Kusunoki, K. Seki, H. Daikoku, H. Saito, I. Kobayashi, and H. Mihara, "High quality 4H-SiC substrates grown by solution growth method for power device applications," pp. 3-4.
- 15) H. Daikoku, S. Kawanishi, and T. Yoshikawa, "Mechanism of Replicating 4H-SiC Polytype during Solution Growth on Concave Surface," *Cryst. Growth Des.*, vol. 18, no. 7, pp. 3820-3826, Jul. 2018.
- 16) S. Kawanishi, T. Yoshikawa, and T. Tanaka, "Equilibrium Phase Relationship between SiC and a Liquid Phase in the Fe-Si-C System at 1523&dash;1723 K," *Mater. Trans.*, vol. 50, no. 4, pp. 806-813, 2009.
- 17) J. Tersoff, "Chemical order in amorphous silicon carbide," *Phys. Rev. B*, vol. 49, no. 23, p. 16349, 1994.

## 研究速報

工学研究科 社会基盤工学専攻

### 資源工学講座 応用地球物理学分野

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

#### 配管内の局所的スケールリング及び減肉現象の 流体物理学的解析

地下から流体資源を取り出して発電を行う地熱発電において、配管内のスケール析出及び管壁減肉の予測・対策はエネルギー生産効率に直結する最重要課題である。本研究ではこれらを予測するための数値解析手法として、物理学的完備性を高めたシリカ微粒子挙動の解析と、流れ加速型腐食の原理と剪断応力の解析に基づき、スケール析出及び配管減肉速度予測モデルの構成則をそれぞれ導出した。さらに格子ボルツマン法により再現される流れ場と結晶成長アルゴリズムを組み合わせることで、局所的なスケールリングと減肉をミクロレベルからマクロレベルまで総合的に解析し、それらの結果を実際の地熱井で観測された複雑なスケール形状や、既存の実験にて計測された配管腐食速度分布と比較した。図1は、配管内スケール析出シミュレーションの一例であり、配管継ぎ手部における局所的なスケール析出が再現されている。本シミュレーション結果は実測データと非常に良く一致し、スケールリングや配管減肉予測に対する流体物理学的アプローチの有効性を示す成果を得た。

#### 個別要素法を用いた超深部地熱開発における 水圧破碎シミュレーション

近年、再生可能エネルギーへの関心の高まりから、延性帯での地熱貯留層造成とそれを利用した地熱発電に注目が集まっている。地下3～6 kmに存在する延性帯の岩石は高温高压条件下にあるため、脆性破壊ではなく延性挙動を示すと考えられる。延性帯での貯留層造成には岩石に流体を高压注入することで岩石を破壊し、人工的に亀裂を生じさせる水圧破碎と呼ばれる技術の利用が想定される。しかし、延性的な挙動を示す岩石で人工的に形成される水圧破碎亀裂の進展や振る舞いに関する予測は必要不可欠であるものの、研究はあまり進んでいないのが現状である。本研究では、水圧破碎の数値シミュレーションに、従来から広く利用されている個別要素法を適用し、岩石の延性挙動、

そして注入流体による冷却効果も考慮した水圧破碎シミュレーションなど、これまであまり顧みられることのなかった数値実験を行なった。数値実験のモデルとして、我が国の深部を構成する岩種である花崗岩を想定し、その延性挙動および流体注入による冷却効果の双方を考慮した水圧破碎を数値的に再現した。図2はシミュレーション結果の一例であり、モデル中央の孔内に圧入された流体が水圧破碎亀裂を生成させ、周囲の岩石を冷却しながら進展していく様子が再現されている。

教授 三ヶ田 均

助教 武川 順一

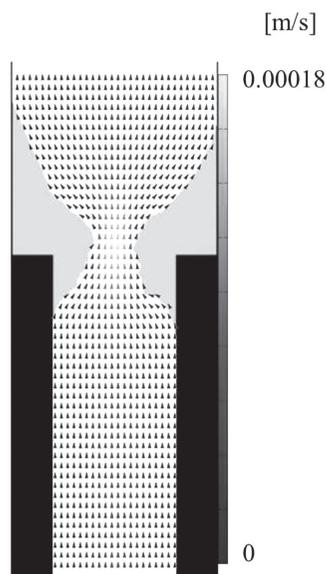


図1 スケール析出シミュレーション結果。下部から上部に流体が流れており、灰色部が析出したスケールを表す。

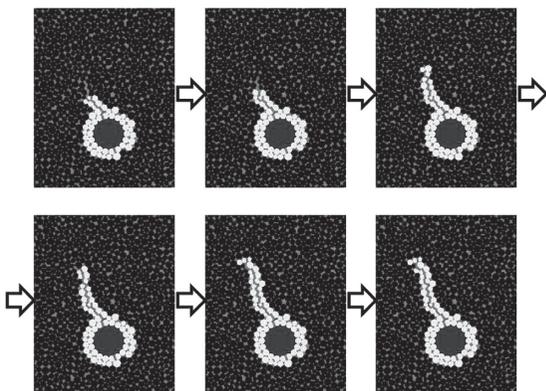


図2 個別要素法による亀裂進展挙動のシミュレーション結果。赤線が水圧破碎亀裂を表し、白色粒子が初期より温度が低下した領域を表す。

工学研究科 社会基盤工学専攻

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

地下深くの岩石は多くの亀裂を有しており、その亀裂の進展が岩盤の不安定を引き起こす。しかしながら、岩盤が破壊するかどうかは、単純に亀裂の進展のみには支配されず、亀裂がずれることによるずれ変位が重要になる。地下深くでは高い封圧条件下にあるため、亀裂が進展したとしても、高い摩擦力のため、亀裂が大きくずれるかどうかは一概に判断できない。本研究では、大型摩擦試験機を用いて、メートルサイズの岩石2個の境界面に法線応力をかけたのち、剪断応力をかけることにより境界面に剪断すべりを発生させる。剪断すべり発生中の摩擦力の時空間変化を測定し、岩石の破壊安定性の性質を調べる。さらに、境界積分方程式法などの数値シミュレーション手法を用いて、実際の剪断破壊現象を計算機上で再現することにより、そこに働く岩石摩擦との関係を調べる。大型岩石摩擦実験により、これまで実験室において簡単には測定できなかったデータが得られており、動摩擦理論構築のための重要な実験データとなっている。さらに、実験室で得られた動摩擦理論考慮して、計算機上で亀裂の破壊伝播の再現を行うことで、岩盤の安定性の評価が可能となる。特に、既存破壊面（断層）が複雑な形状をしている場合、どこまで断層が壊れるかは、亀裂の構造、外部から働くテクトニック応力、そして断層面に働く摩擦力によって決まる。このアプローチにより精度の高い岩盤安定性予測が可能となる。

**高強度高緻密コンクリートの透水係数**

長半減期低発熱放射性廃棄物（TRU廃棄物）には、人工バリアや天然バリアに吸着されにくい核種の濃度が高い廃棄物が存在する。そこで、長期閉じ込め型の容器として高強度高緻密コンクリート（HSULPC）を活用することが考えられている。これまでの研究では、海水中で亀裂修復が顕著に生じることが明らかにされているが、透水係数についてはまだ研究されていない。そこで本研究では、巨視亀裂を導入したHSULPCの透水係数を室内試験により調べることにした。

はじめに、直径50mm、高さ25mmの円柱形のインタクトなHSULPC供試体に対してランジェントパルス透水試験を行い、透水係数を測定した。その結果、 $10^{-12}$ m/sのオーダーの透水係数が得られた。この

値は、インタクトな花崗岩よりも1~2オーダー低い。次に同じ供試体で圧裂引張試験を行って巨視亀裂を導入した供試体を用いて、変水位透水試験を行い、透水係数を測定した。その結果、透水係数はインタクトな試料よりも7オーダー高くなった。続いて巨視亀裂を導入した同じ供試体を人工海水1.5L中で15日間保存した後、変水位透水試験を行い、透水係数を測定した。その結果、透水係数は1オーダー低下した。試料を実体顕微鏡で観察した結果、き裂が部分的に析出物で充填されていることが確認できた。すなわち、人工海水中にHSULPCを保存した場合、き裂の修復が起り、透水係数が低下するということが示された。この現象は、HSULPCの自己修復機能を示すものであり、放射性廃棄物処分にHSULPCが有効であるということが言える。

**堆積岩のサブクリティカルき裂進展**

地下岩盤を利用する上では、岩石の破壊の時間依存性について知る必要がある。応力拡大係数が破壊靱性値未満のときに亀裂が進展する現象はサブクリティカル亀裂進展とよばれており、岩石破壊の時間依存性の主要な現象の一つと考えられている。岩石のサブクリティカル亀裂進展は周辺環境に大きく影響を受けることが知られている。これまでの研究では、水がサブクリティカル亀裂進展に大きな影響を及ぼし、水中では大気中と比べて亀裂進展速度が高くなることが報告されている。地下岩盤に構造物を建設する際にはセメント系材料が多く用いられるため、構造物周辺の地下水中のカルシウムイオン濃度が高くなることが考えられる。これまで水中のサブクリティカル亀裂進展の研究において、カルシウムイオン濃度が高い環境での研究は十分にはされていない。そこで本研究では、砂岩と凝灰岩を試料として用い、堆積岩の亀裂進展速度がカルシウムイオンによってどのように変化するかについて、定変位ダブルトーション試験を行うことで調べた。その結果、カルシウムイオン濃度が高い水中では、蒸留水中よりも亀裂進展速度が低下することが示された。また、この傾向は凝灰岩において顕著に表れており、カルシウムイオン濃度が高い水中では、大気中よりも亀裂進展速度が低くなることが示された。ゆえに、地下岩盤を建設する際に用いられるセメント系材料は、周辺地下水中のカルシウムイオン濃度を高めることから、岩石の長期安定性の確保に役立つと考えられる。

教授 福山 英一  
准教授 奈良 禎太

工学研究科 社会基盤工学専攻

## 資源工学講座 計測評価工学分野

### ローレンツフォース渦電流探傷法の実用性に関する 基礎的検討

最近欧州において、強磁性材料に対する全く新しい渦電流探傷法として、ローレンツフォース渦電流探傷という名称の方法が提案された。この方法は、従来のような交流磁界ではなく、永久磁石による静磁界を用いる方法であって、対象材との相対運動によって誘起される渦電流の量が欠陥の存在によって変動することを、材料内に生じるローレンツ力の反作用として励磁源である永久磁石に作用する曳力や揚力の変化として計測しようとする方法である。探傷という行為には検出要素と材料との相対運動が必然であることを利用したユニークな探傷法といえ、相対運動による磁界変動の周波数が従来の渦電流探傷に比べ低いため、より深い欠陥まで検知可能であることが注目されている。当研究室では、この方法がどれだけの実用性をもつものであるかについて基礎的な検討を行っている。本年度は、並進運動を伴う渦電流の数値シミュレーションを実施し、永久磁石に働く力は、速度の上昇によって、曳力より揚力の方が大きくなること、欠陥信号（欠陥を通過するときのローレンツ力の時間変動）は、速度によってその波形が変化すること、欠陥信号の大きさは、永久磁石の磁界範囲内の欠陥の体積にほぼ比例することなどが明らかとなった。

### 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

強磁性材料に対してバイアス磁界を印加した状態で渦電流探傷を行うという検査法があり、その方法によれば厚鋼板の裏面欠陥まで検知できるとの報告がある。交流磁界の周波数から考えて渦電流が浸透していない位置にある欠陥がなぜ検出できるのか、当研究室ではそのメカニズムについて検討を行っている。これまでの実験的な検討を踏まえ、本年度は、バイアス磁界下の鋼材の静磁場解析の後に、その結果をベースとした渦電流探傷の準定常解析を行うという、2段階の数値解析手法を提案し、探傷信号に及ぼすバイアス磁界の効果について理論的な検討を行った。その結果、バイアス磁界を印加することで裏面欠陥の上部に磁束が集中し、それによって透磁率の変動が欠陥周囲に形成され、さらにその変動が表面にまで及ぶために、渦電流の届かない裏面欠陥の検出までも可能となっているとの考え方が立証された。また、従来の表面欠陥の渦電流探傷においても、欠陥周囲の透磁率変動領域の形成によって、渦電流信号自体を大きくする効果があることが示され、バイアス磁界の効果は、単に磁気不均一性によるノイズの抑制だけでなく、強磁性材料の渦電流探傷においては、SN比の改善に、より大きな効果があることが示唆された。

### 多重周波数渦電流探傷における 信号処理に関する研究

渦電流探傷においては、対象材料に最も適した単一の試験周波数を用いるのが普通であるが、複数の周波数を用いれば、各周波数でのインピーダンス応答の位相が異なることから、それらの信号を適切に組み合わせれば、リフトオフ変動を含め様々な外的要因による雑音を抑制し、より良い欠陥信号の得られる可能性がある。そこで本年度はまず、複数のインピーダンス応答の単純な線形結合として欠陥形状波形を得る方式について、鋼線材のバイアス磁界渦電流探傷を対象として検討を行った。周波数ごとの探傷信号の実部と虚部の波形から、線材に設けたスリット状欠陥の位置と形状を表す波形を得る（ただし、形状波形そのものでなく、それを検出器の官能幅で移動平均した波形に近似させる）ことを目標としたが、そのような単純な線形結合でも、ノイズを抑制することができ、欠陥形状に近い波形の得られることがわかった。また、単一周波数での近似曲線よりも、二つないし三つの周波数による探傷信号を用いた方が、より小さな欠陥までSN比の良い波形の得られることが明らかとなった。今後は、インピーダンス応答に本来的な複素量としての取り扱いについて検討し、オフライン処理ではない、より実用的な多重周波数信号処理の方法を提案していきたいと考えている。

### ワイヤロープ磁気検査における ロープ移動速度の影響

直流磁界を用いるワイヤロープの漏洩磁束探傷あるいは全磁束測定において、検査時のロープ移動速度が測定性能にどのように影響するか、簡単な軸対称モデルによる数値解析にもとづいて検討を行った。磁化器と対象材との軸方向の相対運動によって、対象材断面内には周方向の渦電流が誘起され、その強さは移動速度に比例する。外部から与えた静磁界は、運動渦電流の影響で移動方向に引きずられるような非対称な分布となり、そのことが断面内での磁束密度の不均一性を生み、引いては深部欠陥の検出能を妨げることが示された。そのような移動に伴う探傷への悪影響は、鋼棒など断面が一樣な導体では著しいものの、ワイヤロープの場合には、素線の集束体であることから断面内における導電性が低く、その分だけ悪影響は抑制される。材料のもつ非線形磁化特性がさらに抑制的に作用するため、ロープを飽和まで強く磁化すれば、移動速度によらず磁化器直下の磁場をほぼ均一に保つことができ、探傷信号への影響はほとんど現れないことが示された。強い飽和磁化を用いることの優位性は顕著であり、実用ロープテストにおいて、探傷波形が非対称になる事例がよく認められるが、それは起磁力の不足に原因があると判断される。

准教授 塚田 和彦

工学研究科 都市社会工学専攻

**地球資源学講座  
地殻環境工学分野****鉱物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、国内外の陸域・海域を研究フィールドとして、リモートセンシングと地球統計学的手法開発、および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、地質マッピングに有用であるが空間分解能が低い衛星画像を、現在の最高レベルの空間分解能画像に変換するという高分解能化法を開発した。前者の代表であるASTER画像に本手法を適用した結果、鉱物分布が格段に詳細になり、その妥当性はネバダ州の熱水鉱床域ゴールドフィールドでの現地調査によって検証できた。

次に、地球統計学研究では、空間的相関構造のスケール則を抽出し、これと地質データを用いることで、従来の手法よりも細かい間隔で金属濃度を精度良く推定することが可能になった。これを黒鉱鉱床と斑岩銅鉱床のデータに適用したところ、鉱床モデルに整合した金属濃度分布が得られた。データ量が極めて限られている海底熱水噴出域での金属濃度分布には、深層学習を応用することで、断層に関連した濃度分布などを広域にわたって把握できるようになった。この分布の妥当性を、熱水流動シミュレーションから検討しているところである。さらに、金属鉱床の元素濃度と鉱床タイプや形成年代との関係を明らかにすることを目的とし、本学総合博物館所属の鉱石試料を用いて、元素濃度と鉱物組成分析を行った。分析は継続中であるが、同じスカルン鉱床でも形成年代によって主要金属濃度が異なるなどの特徴を明らかにできた。

**地殻流体流動現象の把握とモデル化**

地殻中には、水、油、ガスなどの重要な資源流体が存在し、それらの利用を図る上で流体の起源や流動状態の理解が不可欠である。そこで、その理解に役立つ地球化学的指標を分析するとともに、流動場の地質構造や流動現象に関わる特性の空間分布を踏まえたモデル構築を行い、流動状態をシミュレーションすることで、地球の深部から表層まで様々なスケールの流体流動現象を明らかにするための研究を進めている。

地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・バンドン盆地周辺の4箇所の地熱地域で温泉や地熱生産井から水試料を採取し、ヨウ素の放射性同位体の分析を行った。得られたヨウ素同位体比 ( $^{129}\text{I}/\text{I}$ ) は一部の地点で地表付近に分布する岩石よりも古い年代を示し、熱水が地下深部から上昇していることが明らかとなった。

地域的な大気六フッ化硫黄 ( $\text{SF}_6$ ) 濃度の時間変化を復元する手法の開発を目的とした研究では、京都盆地をモデルサイトとし、作成した三次元水理地質モデルを用いて地下水流動解析と  $\text{SF}_6$  の物質移行解析を

行った。大気  $\text{SF}_6$  濃度が京都市の製造業の事業所数に応じて変化すると仮定した場合に、物質移行解析で算出される地下水の  $\text{SF}_6$  濃度と実測値の誤差が最小となった。本手法は、都市域など  $\text{SF}_6$  の排出源が存在し、大気濃度が高い地域で  $\text{SF}_6$  を用いた地下水の滞留時間推定を行う際の精度向上に資する。また、地下水流動解析と物質移行解析、反応輸送解析を活用し、長期間にわたる断層周辺の地下水流動と物質移行挙動を明らかにするための研究も実施している。

**蒸気スポット検出技術の開発**

地熱資源の利用促進のために、リモートセンシング・地球化学・鉱物学での先端手法を統合して、地熱発電に最適な蒸気スポットを高精度で検出できる技術の開発を進めている。モデルサイトであるバンドン南部のWayang Windu 地区では、ハイパースペクトル衛星画像の分光反射率分離法によって、植生に覆われた地域からの熱水変質帯の抽出精度を向上させることができた。また、合成開口レーダ画像の差分干渉処理において北向きと南向きの2つの軌道データを組み合わせることで、地形変化量を3次的に計測できるようになり、これは熱源の位置と広がりへの推定に有効であることがわかった。

また、ラドン・水銀濃度やガス成分のモニタリング測定をPatuha地熱地区にも展開し、これらの測定によるガス濃度異常地点が貯留層からの熱水の上昇パス上に位置することが、地磁気-地電流法 (AMT) による比抵抗分布の線状構造からも推定できた。

**海底資源・地熱資源に対する物理探査技術の開発**

資源探査が地下深部や海底へと向かう中、地下のエネルギー・金属資源の探査手法の高度化が不可欠となっている。そこで、物理探査データ解析、地下構造のモデリングおよび解釈の3つについて研究開発を進めている。データ解析技術では、地下浅部の空洞規模の定量化を目的として、地中レーダの反射波スペクトル解析法を開発した。地下構造モデリング技術では、電場ダイポール長の極めて短いAMT法を国内およびインドネシアの地熱地域に適用し、稠密な観測データに基づく3次元地下構造可視化方法を考案した。また、海底電気探査の実データインバージョンを実施し、沖縄海底熱水鉱床の詳細な内部構造を明らかにした。地下構造解釈技術では、新たな岩石物理モデルの構築を実施し、海底熱水鉱床で得られた岩石試料の複素比抵抗の特徴の解釈を試みた。その結果、岩石物理モデルのパラメータと導電性鉱物含有量に明瞭な関係が認められることが明らかとなった。さらに、物理探査データと地質情報からフラクチャー岩盤のモデル化を実施したところ、この岩盤の透水性の推定が行えることが示された。

教授 小池 克明  
助教 柏谷 公希

工学研究科 都市社会工学専攻

## 地球資源学講座 地球資源システム分野

当研究室では、石油・天然ガスや地熱などの地下エネルギー資源を開発する地球工学分野から、地殻応力と物性の測定から断層運動を解明する地球科学分野まで、“地球”、“資源”、“エネルギー”、“断層”、“環境”などをキーワードに幅広く研究を行っている。平成30年度には主に以下の研究を行った。

### コア変形法 (DCDA) の改良及びそれを用いた地殻応力測定に関する研究

石油等の資源開発では正確な地殻応力場の測定が重要である。測定コストの高い原位置測定法の補完・代替法として、測定が容易で迅速なコア変形法が期待されている。しかしコア変形法には、傾斜坑井での測定が困難であること、非弾性変形を考慮していないために応力値を過大評価してしまうことという問題があった。本研究ではコア変形法の理論及び解析方法を改良し、新しい改良手法を考案した。傾斜坑井への適応については、コア径の変形を表す理論式を導出しそれによりコア径の測定結果をフィッティングすることで逆解析的に水平主応力方向とその絶対値を導出するという方法を考案した。また非弾性変形の考慮については、岩石を粘弾性モデルで仮定することにより可能にした。この二つを合わせることにより、傾斜と非弾性変形の両方を考慮したコア変形法の解析手法を考案することができた。実フィールドのコアを用いてこの改良手法による地殻応力の測定を行った結果、解析した主応力方向とその絶対値は、傾斜及び非弾性変形の影響を適切に反映した結果となり、従来の手法と比較して測定精度の向上が確認された。

### セルロースナノファイバーを用いた環境調和型石油増進回収法に関する研究

豊富な木質資源由来で生分解性のあるセルロースナノファイバー (CNF) を油層の空隙よりも小さいナノサイズの W/O または W/O/W のエマルジョンに閉じ込めて油層内の卓越流路に圧入することで、石油の増進回収 (EOR) とその環境負荷低減を目指す研究を実施している。CNF を含んだエマルジョンが時間経過により破壊すると、CNF が放出されて卓越流路を閉塞する。これにより、卓越流路以外にも流路が広がり、残留している油が回収されるようになる。n-ドデカンに対して 1/10 の体積の界面活性剤とそれぞれ 1/6 の体積の CNF 懸濁液、NaCl ブラインを加え攪拌して作製した W/O エマルジョンについては、粒度分布測定とフェノール硫酸法により、目的の CNF を含んでいるナノサイズのものであることが確認できた。一方、この W/O エマルジョンと PVA (ポリビニルア

ルコール) で作製した W/O/W エマルジョンについては、塩濃度によって粒径が大きすぎるものや、CNF が含有されていないものがあり、その作製方法について更なる検討が必要であることがわかった。

### デジタルオイルと分子動力学によるアスファルテン障害対策の検討に関する研究

アスファルテン障害対策では、アスファルテンの凝集メカニズム、析出開始圧力、有効な分散剤等について分子スケールから検討することが有効である。本研究では、アスファルテン障害が発生している国内 A 油田を対象に、その原油の分子モデル (87種類、4651 分子) をコンピュータ上に再現したデジタルオイルを構築し、分子動力学 (MD) 計算を実施することで、アスファルテン分子の凝集状態を調べた。また、モル分率が最大のアスファルテン分子に対して種々の分散剤中での会合エネルギーを評価することで、最適なアスファルテン分散剤の検討を行った。それらの結果、アスファルテン分子は  $\pi$ - $\pi$  stacking と T-shape を多数形成して凝集し、特に、 $\pi$ - $\pi$  stacking ではヘテロ原子どうしが離れる配置で凝集することがわかった。また、モル分率が最大のアスファルテン分子の会合エネルギーは、キシレン、トルエン-IPA 混合物 (体積比 2 : 3)、ベンゼン、トルエン、IPA (イソプロピルアルコール) の順に大きくなり、これらの中ではキシレンが分散剤として最適であることがわかった。

### 野島断層掘削における応力測定に関する研究

1995年に発生した兵庫県南部地震の震源断層“野島断層”を貫通した掘削孔において、孔壁イメージから読み取るブレイクアウトの解析およびコア試料を用いる非弾性ひずみ回復 (ASR) 法による応力測定を行った。その結果、野島断層のダメージゾーンまでの深度における最大主応力方向は北西～南東であり、野島断層の走向とほぼ直交することが判明した。したがって、当該深度範囲では野島断層の横ずれすべりを起こすようなせん断応力が小さいことが示唆された。一方、野島断層のダメージゾーンより深い部分では、最大水平主応力方向は断層走向と約 20° 斜交する結果が得られた。これは断層面上にせん断応力が存在していることを示唆する結果である。また、コア試料の応力測定結果から、上盤と断層ダメージゾーンにおいては正断層型の応力状態となり、下盤においては正断層型から横ずれ断層型へ応力状態が変化することがわかった。これらの結果と既往の応力測定結果と比較することで、現在の応力状態が地震直後のそれと異なり、地震後の約20数年間において応力の回復があった可能性があることが推測された。

教授 林 為人  
准教授 村田 澄彦  
助教 石塚 師也

**資源エネルギー学講座  
資源エネルギーシステム学分野****銅めっきを利用した鉄シートの接合**

近年、輸送機器の軽量化を目的として銅板等鉄鋼素材の高度な接合技術の開発が進められている。本研究では新しい接合手法としてめっきによる接合を提案し、2枚の純鉄平板の板間に銅めっきを行うことで金属による室温接合を試みた。ここで、めっき接合前に酸化/還元処理によって純鉄の接合面(表面)にマイクロメートルオーダーの微細孔を形成させることとした。この表面の微細孔にめっきを入り込ませることで物理的な引っ掛かりを生じさせ、純鉄基材/銅めっき間の界面強度の向上を図った。

純鉄平板を1073Kで30分間空気中において酸化した後、1273Kまで真空中で昇温した。これを2時間Ar-10% $H_2$ 雰囲気において還元することで、純鉄表面のポーラス化に成功した。次に、銅めっきによく使われる硫酸銅浴は酸性でありめっき基材の純鉄を溶かしてしまうため、この試料に対して中性めっき浴であるピロリン酸銅めっきを行った。ピロリン酸銅浴を採用することで、ポーラス構造を溶かすことなく表面を銅めっきで覆うことができた。このような前処理を行った二枚の純鉄板試料の板間に硫酸銅めっきを施した。種々の実験により条件を最適化した結果、接合強度(せん断強度)は11MPaに達した。

**ナノポーラス金の表面効果による  
インテグリン不活性化の動的解析**

近年、ナノポーラス金(NPG)が新たなバイオマテリアルとして注目されており、NPG上でHeLa細胞がアポトーシスを生じることが明らかになった。この機構は、金ナノ粒子等で知られている核への直接的な作用ではなく、NPGがインテグリンを介するシグナル伝達に影響し、核内部の転写活性に間接的影響を及ぼすと考えられるが、その詳細は明らかではない。

そこで本研究ではNPGとインテグリンの相互作用を、第一原理計算と分子動力学(MD)によるシミュレーションで解析した。第一原理計算では、インテグリンに特異的に結合するRGDアミノ酸配列をNPGおよび平滑金(FG)表面に吸着したモデルを作成し、構造最適化した。FG上ではRGDの大きな構造変化は見られなかったが、NPG上では構造が大きく湾曲した。また、金原子とNPG側鎖酸素原子間の電子状態密度を調べた結果、NPG上では共有結合性のピークが同一エネルギー準位に生じたが、FG上では確認されなかった。続くMD計算では、構造最適化したRGDをインテグリンへと結合させたモデルの主成分分析により、MDの軌道を主成分ベクトルの張る平面上へと射影した。FG上のモデルの主成分分析結果には二つのクラスターが存在し、これはインテグリンのclosed構造とopen構造に対応した。しかし、NPG上ではclosed構造のクラスターのみが生じ、安定なopen構造は存在しなかった。以上より、NPG上ではインテグリンを介するシグナル伝達が正常に行われず、細胞の生存維持が妨げられたと示唆される。

**無機材料を用いた細胞および細胞シートの脱着**

近年、細胞ベースの治療法や組織工学が著しい進歩を遂げており、細胞と細胞外マトリクス(ECM)からなる「細胞シート」と呼ばれるシート様細胞凝集体が注目を集めている。本研究では無機材料を使った細胞剥離法を2つ提案した。

1つ目は炭酸カルシウムの溶解を利用する方法である。基板上にポリアクリル酸を添加した水溶液から微細な炭酸カルシウムを均一に析出させ、その表面で培養したヒト細胞は、pHを4.1に低下させると5分以内で80%が剥離した。一方で、pH4.1時の生存率は20分後であってもpH7.6(生体に近い)の場合と同程度であった。以上からこの方法が酵素に依らない新しい細胞剥離技術として有望であることを示した。また、同様の基板上で作製した細胞シートはpHを下げることで自発的に剥離し始め、15分以内で細胞がほとんど生存したままで回収できた。

2つ目は金を細胞培養基板として用い、そこに通電することによりECMを熱変性させる方法である。通電加熱によりECMであるコラーゲンはゼラチンに熱変性し、細胞接着率は大きく減少した。この結果はコラーゲンおよびゼラチンが金基質または細胞接着タンパク質のいずれかに付着する可能性を調べた第一原理計算の結果と一致した。

**貴金属における近接抗菌作用の発現と応用**

ナノメートルオーダーの孔を有するナノポーラス金(NPG)は従来の金属材料のような金属イオンや活性酸素などの効果とは異なるNPG特有の抗菌活性をもつ。近年、細菌がNPG表面と接触した後、細菌の細胞壁が負に過分極することによって抗菌活性を示すことが確認された。電子が金属表面に染み出すと電気二重層が形成され、正の電荷を持つ金属表面が形成される。

そこで本研究では、電子の染み出しの指標として仕事関数を測定し、仕事関数と抗菌活性との関係を調査した。具体的にはNPGに白金を添加し仕事関数を変化させ、NPG、NPG-Pt、FG(フラット金)で仕事関数と抗菌活性値を測定した。結果、NPG、NPG-Ptの仕事関数と抗菌活性値はFGのそれよりも高く、仕事関数と抗菌活性値には正の相関があった。またこの結果からNPGの抗菌活性は「短距離」で働くことが裏付けられた。

さらに上記の抗菌メカニズムを応用し、FGマイクロ島状構造をもつNPG基板(この場合、島と島との間の溝表面がNPGになっている)を作製し、大腸菌の選択的抗菌を試みた。具体的には、FGマイクロ島状構造をもつNPG基板上で脂肪前駆細胞と大腸菌を共培養し、細胞ならびに大腸菌の活性を評価した。その結果、FGマイクロ島状構造のみと接触した脂肪前駆細胞は高い生細胞率で生存した一方で、NPGの溝にトラップされた大腸菌は死滅し、選択的抗菌を実現できた。

教授 馬淵 守  
准教授 袴田 昌高  
助教 陳 友晴

エネルギー科学研究科 エネルギー応用科学専攻

資源エネルギー学講座  
資源エネルギープロセス学分野

### 移動高温固体面に対する液滴列衝突挙動

金属素材の冷却による熱処理では、移動体へのスプレー冷却が広く利用されている。液滴と加熱固体との衝突はスプレー冷却の基本的な物理現象であり、それを十分に理解することで冷却制御技術の精度向上が期待できる。これまで静止加熱固体へ衝突する単一液滴の変形挙動について多数の研究例があるが、移動体を対象とするものは非常に少ない。本研究では、直径、速度および間隔の揃った水液滴列を加熱金属に衝突させ、その流動現象を可視化実験により研究した。移動体への液滴衝突では、固液界面で固体と冷媒の速度差に起因する摩擦応力が必然的に発生するため、それが液滴衝突現象に影響を及ぼすことが明らかになった。固液直接接触と蒸気気泡が生成する核沸騰領域や、固体と冷媒の速度差が大きい条件では摩擦応力が大きくなり、液滴は複雑な3次元流動を示した。一方、安定な蒸気膜が形成される膜沸騰領域では、軸対称に近い変形衝突挙動を示した。

(武下 大成, 現: 新日鐵住金(株))

### 高速移動体水噴流冷却の沸騰熱伝達特性

移動高温金属を衝突水噴流群で強冷却するラミナー冷却技術は、連続生産される鉄鋼材料の加工熱処理に必須の技術である。近年、遷移沸騰と呼ばれる冷却制御が困難な温度領域に冷却停止する素材が増え、そこでの伝熱特性、とりわけ素材の搬送速度が大きい場合のデータが必要となっている。本研究では、300℃～550℃に加熱した厚さ0.3mmのステンレス鋼板を数m/sで搬送し、それをパイプラミナー流で水冷却したときの沸騰熱伝達特性をラボ実験により研究した。冷却特性はサーモグラフィで面計測した鋼板温度分布を境界条件とする3次元熱伝導方程式の逆解析によって評価した。その結果、鋼板の搬送速度が大きい条件では、遷移沸騰と膜沸騰の境界である最小熱流束値が小さくなること、核沸騰と遷移沸騰の境界の(見かけの)鋼板温度が高くなることを見出した。さらに、核沸騰と膜沸騰領域の冷却特性について、冷却水流量、鋼板搬送速度および鋼板温度を影響因子とする整理式を構築した。

(永田 恵督, 現: パナソニック(株))

### 種々の時効処理を施した準安定型チタン合金板における準静的な変形特性

$\beta$ チタンは、時効によりBCC( $\beta$ )母相からHCP( $\alpha$ )相が析出し、 $\alpha$ 相分率に応じて機械的特性が変化することが知られている。本研究では、500℃で時効時間を変えることで $\alpha$ 相分率が様々に異なる $\beta$ チタン時効材を作成し、機械的特性と $\alpha$ 相分率の関係を包括的に整理することを試みた。本研究の結果、 $\beta$ チタンは

$\alpha$ 相分率36%で降伏強度のピークを示す一方で、バウシinger効果は $\alpha$ 相分率25%でピークを示すことがわかった。一般に、時効硬化曲線はある特定の $\alpha$ 相分率においてピークを示す。この素過程はオロワン機構で説明され、バウシinger効果にも大きく影響すると考えられてきた。このことから、バウシinger効果にはオロワン機構以外のメカニズムも影響していることが示唆された。

(中辻 雄也, 現: 新日鐵住金(株))

### 純チタン2種板の円筒絞り成形に関する結晶塑性有限要素解析

工業用純チタン板は比強度、耐食性、耐熱性に優れており、航空宇宙分野や医療分野、民生部品等で用いられている。一方で純チタン圧延板はその強い変形異方性のため、プレス加工時における成形不良の予測が困難なことが課題となっている。成形予測精度の向上には加工時の特性の詳細な把握が求められる。そこで本研究では、円筒絞り成形を対象として実験および結晶塑性有限要素解析を行い、板厚分布や耳の発生といった巨視的な変形挙動や、また変形中に活動する変形機構や結晶組織の発生といった微視的な変形挙動を研究した。その結果、圧延方向から45°方向で大きな耳が発達し、また円筒の周方向で双晶活動に伴う集合組織の発生が大きく異なることが明らかとなった。双晶が活動をしないと仮定して数値実験を行ったところ、成形品形状にほとんど違いは見られず、双晶の活動は成形品の形状に対して大きな影響を与えないことが示唆された。

(平野 夏帆, 現: 川崎重工業(株))

### 種々の比例および非比例負荷経路における6022-T4アルミニウム合金板の塑性流動

近年、板材のプレス加工における成形不良を事前に予測するため、有限要素法を用いた塑性加工シミュレーションが日常的に使用されている。しかしながらシミュレーションによる予測精度は未だ発展途上であり、解析精度の更なる向上が切望されている。一般的に、解析においては、塑性流動則として法線則が仮定されている。しかしながら、実験的には法線則が条件によっては成立せず、そのため法線則を仮定した場合、しわやくびれといった塑性不安定現象を正確に予測できないことが指摘されている。そこで本研究では、6022-T4アルミニウム合金板を用いて、様々な負荷経路における二軸引張試験を行い、法線則の成立条件を詳細に調査した。その結果、比例負荷および緩やかに経路変化する場合は法線則を満足し、経路が急変する場合は法線則から逸脱することが明らかとなった。また、法線則から逸脱する原因は、経路の急変に伴う塑性ひずみ増分方向の急激な変化に、応力比が追従できないことにあることを明らかにした。

(八木 翔吾, 現: パナソニック(株))

教授 宅田 裕彦  
准教授 浜 孝之

エネルギー科学研究科 エネルギー応用科学専攻

**資源エネルギー学講座  
ミネラルプロセス分野****エネルギー作物のメタン発酵収率向上に関する研究**

有機廃棄物からエネルギーを取り出すことで資源循環を作り上げ、持続可能な社会の確立を目指す取り組みが近年盛んになっている。なかでもメタン発酵は、メタン菌の働きによってバイオマスからメタンを生産するプロセスとして期待されているが、発酵の過程で発生する消化液の処分コストが大きな課題となっている。消化液を液肥として通年利用可能なエネルギー作物に施用し、さらにこれを発酵原料として投入することができれば、メタン発酵の消化液の処分コスト低下とメタン発生量増加を同時に達成できると考えられる。しかしながら、エネルギー作物を構成する植物細胞の主成分であるセルロースやリグニンは難分解性であり、分解を如何に促すがが実用化に向けた鍵となっている。そこで、本研究では代表的なエネルギー作物の一つであるエリアンサスを、セルロースやリグニンの割合が異なる葉と茎に分けて前処理を施し、エネルギー作物のメタン発酵収率向上に向けた検討を行った。その結果、発酵中の累積メタン発生量は、葉と茎ともに未処理の場合に対して熱アルカリ処理で、27日目まででメタン発生量が増加し、より早い日数でメタンの発生が増加した。また、熱アルカリ処理を施した条件では茎の方がより早い日数でメタン発生量が増加した。また、葉と茎ともに熱アルカリ処理は未処理に比べて、CODの値の著しい増加が計測された。熱アルカリ処理を施した条件で葉よりも茎の方が早い日数でメタン発生量が増加した要因は、リグニンの可溶化が促進されたためだと推測した。

**分子動力学シミュレーションを用いたメタンハイドレートにおけるガス置換メカニズムの解明**

近年、エネルギー問題や環境問題の対策が急務となっており、これらの問題解決へのアプローチの1つとしてCO<sub>2</sub>-CH<sub>4</sub>ハイドレート置換法が新たに検討されている。この方法ではCH<sub>4</sub>を取り出すことができるだけでなく、大気中のCO<sub>2</sub>を地下のハイドレート層内に隔離することが期待される。本研究では、分子動力学(MD)シミュレーションを用いて圧入条件の違いによるメタンハイドレートへの置換現象を解析し、室内実験との比較を行なうことでCO<sub>2</sub>-CH<sub>4</sub>ガス置換メカニズムの解明を試みた。その結果、圧入ガス組成がCO<sub>2</sub>:N<sub>2</sub>=77:23, 50:50, 23:77の時のCH<sub>4</sub>回収率は55%~70%となり大きな差は見られなかったが、ガス組成がCO<sub>2</sub>:N<sub>2</sub>=0:100の時のCH<sub>4</sub>回収率は4.4%と他に比べて著しく低い値が得られた。二体相関関数グラフにおける時間ごとのピーク領域の面積を比較したところ、0.1nsで多くのN<sub>2</sub>がメタンハイドレート内部に侵入しており、CH<sub>4</sub>はハイドレート内部に留まり続

けていることがわかった。これによりハイドレート構造はN<sub>2</sub>によって一部崩壊するが、周りにN<sub>2</sub>とCH<sub>4</sub>しか存在しないため初期段階ではすぐにメタンハイドレート構造を形成し直すということが考えられた。また、0.1nsで多くのN<sub>2</sub>がメタンハイドレート内部に侵入し、それによりハイドレート構造を一部崩壊させてCH<sub>4</sub>が放出し、CH<sub>4</sub>が元々存在していた場所に二酸化炭素ハイドレートが優先的に形成されていることがわかった。

**湿式法による製鋼スラグのリサイクリング**

鉄鋼業においては製鋼スラグが大量に発生するため、製鋼スラグのマテリアルリサイクル技術の確立が望まれている。本研究では、製鋼スラグ中に含まれるCa成分を分離してCaCO<sub>3</sub>として回収すべく、微粉砕された製鋼スラグを対象とし、それに湿式処理を施した後、磁選によりCa成分とFe成分の分離性と単体分離度について検討した。その結果、酢酸で浸出した試料の場合、Caは未処理の20%からおよそ5~9%まで低下できることを見出した。また、炭酸ガスを吹き込んで湿式粉砕した試料中のCa品位は、未処理の20%から15%に減少したものの、前者ののようなCaの大幅な減少は認められなかった。スラグ試料中のCaOの溶出は、粒子内部に存在する微細なクラックにH<sup>+</sup>を送り込み、溶解させたCaOをCa<sup>2+</sup>として存在させ、クラックを通じて溶液中に放出させることによってできることを考察した。

**ハイドレートをを用いた天然ガス輸送の  
新たな添加剤の開発**

天然ガスの貯蔵・長距離輸送において現在ではLNGを用いた輸送が一般的に利用されている。しかしながらこの手法は設備投資や液化に要するエネルギーの大きさ等の観点において多大なコストがかかるため、対象となるのは大規模ガス田に限られ利用されているのが現状である。一方、未開発な中小ガス油田は世界中に多数存在し、それらを長距離輸送し国際商品として活用する手段として現在ハイドレート化が検討されており、その輸送効率向上が必要とされている。そこで本研究ではさまざまな添加剤およびその組み合わせを用いて、安定性の増大およびメタン内包量の増大を検討した。その結果、今回用いたすべてのアルコール添加により分解時間の増大およびメタン内包量の増大が確認された。次に各アルコール同士の混合によりさらなる安定性および内包量の増大を試みた。メタノールでは分解時間が短くなり、2プロパノールではメタン内包量が減少したが、混合物において分解時間およびメタン内包量双方の増大が確認された。

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

材料設計工学講座  
材料設計工学分野

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

教 授 松原英一郎

工学研究科 材料工学専攻

**材料プロセス工学講座  
表面処理工学分野**

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

**・チタンの新規製錬プロセス**

チタン (Ti) は資源量が豊富で強く、海水中でも高い耐食性を示すため、エネルギー効率の高い輸送機器や半永久的に使用可能な海洋建築物の製造にも高いポテンシャルを有している。しかし、従来の製造法は生産効率が低いためにその価格は高く、一般的には普及していない。そこで本研究では、Ti の生産性の改善を目指し、次のような二種類の新しいTi 製造プロセスを研究している。

ひとつ目は、熔融ビスマス (Bi) を用いた Ti の新製錬プロセスであり、 $TiCl_4$  の Mg 還元による Bi-Ti 液体合金の生成、Bi-Ti 合金からの偏析による Ti の濃縮、および真空蒸留による Bi-Ti 合金からの Bi の除去を組み合わせることで粉末 Ti を生産する。このプロセスの研究は、各工程の実証実験を終え、社会実装を想定した実験に移行しつつある。近年は合金の処理量のスケールアップと偏析工程の効率化、真空蒸留の高速化を進めている。偏析工程における Bi-Ti 合金からの  $Bi_9Ti_8$  の回収では、リボルバー型と呼ばれる回収治具を用いることで  $Bi_9Ti_8$  の回収量を向上させることができた。また、真空蒸留により、72時間で約 60 g の純チタンに近い組成物を得ることに成功した。さらに、3D プリンターなどへの応用を目指した球状 Ti 粉の作製にも着手している。ふたつ目のプロセスでは、 $TiCl_2$  を含む熔融塩中での Ti の平滑電析によって Ti の箔および板材を安価に製造する。昨年までの研究で、Mo やグラッシーカーボンといったカソード基板上に Ti を平滑に電析させ、基板から Ti を剥離することで Ti 箔が得られた。ただし、Ti の析出形態は電解液の組成や電流密度 (電極面積) に影響を受けるため、平滑な Ti を安定して得ることが難しい。そこで、現在はこれらの要素を把握する手法についてそれぞれ開発を進めている。

**・中温型燃料電池に適したプロトン伝導性電解質の  
新材料探索**

立方晶ペロブスカイト型構造を有する Y-doped  $BaZrO_3$  は高いプロトン伝導性と優れた化学的安定性を併せもつことから、450–600 °C 程度の中温域で動作する燃料電池の電解質材料として注目を集めている。しかし、難焼結性や酸化雰囲気下でのホール伝導性などの解決

困難な課題があり、実用化に向けたボトルネックとなっている。そこで我々の研究室では、第一原理計算と機械学習を組み合わせた効率的なポテンシャルエネルギー曲面 (PES) 解析手法に基づいて、無機結晶構造データベース (ICSD) に報告されている種々の酸化物のプロトン移動度を網羅的に評価し、新たな電解質材料候補の探索に取り組んでいる。現時点で解析を終えている化合物は150種程度であるが、既に、 $BaZrO_3$  に匹敵する移動度が期待される有望構造が約 50 種見出されている状況である。さらに、これら 50 種の有望構造に対して、プロトン移動度の低下を引き起こすドーパントによるプロントラッピング効果を定量評価したところ、Y-doped  $BaZrO_3$  に匹敵する有望構造が24種に絞られた。本解析は次年度以降も継続して進める予定であり、理論計算主導の新しいプロトン伝導性電解質材料の発見を目指す。

**・排熱の有効利用のための化学蓄熱材料**

工場などでは 100–250 °C 程度の排熱が多量に捨てられている。化学蓄熱は化学反応熱を利用した蓄熱技術であり、排熱の有効利用のための技術として期待されている。しかし、実用上求められる条件 (安全・安価・高蓄熱密度・高繰り返し耐久性・非腐食性) を満たしつつ、低い反応温度域 (250 °C 以下) と十分な反応速度を両立する反応系は未だ見つかっていない。

本研究では、硫酸ランタン水和物  $La_2(SO_4)_3 \cdot H_2O$  が 100–200 °C において小さな温度ヒステリシス (50 °C 以下) で可逆的に脱水・水和反応を起こすことを見出した。これまでに、この反応は、 $La_2(SO_4)_3$  が相変化することなく結晶中に  $H_2O$  分子が脱挿入されるという硫酸塩としては珍しい機構によることが示された。さらに昨年度は、熱重量測定により求めた  $La_2(SO_4)_3$  粉末の水和反応速度と第一原理計算により求めた  $La_2(SO_4)_3$  結晶中の  $H_2O$  の拡散係数を比較検討した結果、高速反応を可能にする別の機構の存在も示唆された。そこで、ガス吸着測定および透過型電子顕微鏡により  $La_2(SO_4)_3$  粉末の組織を調査したところ、ガス拡散可能な「緩い粒界」と数百 nm 厚の薄板状結晶が積層した「板状節理」状の微細組織が粒子内に存在し、水分子は粒界を優先的に拡散することで高速反応が可能になっていることが分かった。この特徴的な微細組織は、原料である  $La_2(SO_4)_3 \cdot 9H_2O$  粉末を脱水して  $La_2(SO_4)_3$  を作製した際に生成したと考えられる。

ただし、 $La_2(SO_4)_3$  は蓄熱密度の観点から実用は難しいこともわかってきた。今後はこのような優れた特徴を持ちつつさらに蓄熱密度の高い材料の発見を目指す。材料探索を進める。

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

工学研究科 材料工学専攻

### 材料プロセス工学講座 物質情報工学分野

X線分光、輸送現象論、量子力学などに基づき、金属材料分析のための新しい分析手法・デバイスの開発を行っている。以下に昨年度の研究概略を示す。

#### 【ED-XRFにおける第一原理定量法に関する 基礎研究と鉄鋼分析への適用】

迅速・多元素同時分析が可能なエネルギー分散型蛍光X線分析(ED-XRF)装置は、小型化・低価格化が加速し簡易分析が可能な装置として普及している。その一方、分析精度の悪化やアナログ信号処理方式からデジタル方式への転換に伴う分析装置の“ブラックボックス”化が進んでいる。当グループでは分析装置の信号処理過程における“ブラックボックス”を詳らかにすることで、ED-XRFを用いた簡易・迅速・精密な分析を目指している。

鉄鋼の工程管理分析などの高い精度が要求される分析には、上記の“ブラックボックス”を理由に定量補正法の議論を行うことが難しいED-XRFは用いられず、分析元素に応じた分光結晶を複数台配置した波長分散型蛍光X線分析(WD-XRF)装置を用いた検量線法に基づく方法が用いられる。このWD-XRFによる定量法は日本独自の高精度鉄鋼分析手法として規格化されている。一方で、蛍光X線分析の主流がWD-XRFからED-XRFへ置き換わった現在、ED-XRFで得られた蛍光X線スペクトルを基に定量を行なった場合、鉄鋼分析の定量値がどの程度の精度や正確さを有するかを評価しておくことは重要であると考えられる。そこで当研究室では、標準試料を用いず物理定数のみから蛍光X線の理論強度を計算し絶対定量値を得ることのできる第一原理計算法(ファンダメンタルパラメータ法)とED-XRFで測定した蛍光X線スペクトルを基にステンレス鋼中に含まれる元素の定量を行うことで、ED-XRFを用いた鉄鋼分析の精度と確度を評価した。計算に用いるプログラムとXRF装置を自作し、理論強度計算式や入射X線スペクトルなどの入力パラメータを変更した場合の定量結果を比較することで、計算過程と定量精度の関係について調べた。その結果、ED-XRFを用いた場合、定量計算に用いるパラメータを厳密に設定しなくても、ICP-AESによる化学分析と同程度の精度で濃度を求め、ステンレスの種類を同定することができることを示した。

#### 【偏光素子により散乱されるX線の 偏光度測定装置の製作】

我々のグループでは低出力X線源を用いたアクリルブロック製の小型偏光光学系XRF装置を試作した。試作した小型装置を用いて試料中の微量成分分析を目指しステンレス鋼材などの測定を行う中で、軽元素偏光素子からのコンプトン散乱を利用することで、数ワットのX線管から放射される白色X線をそのスペクトル領域全域にわたって同時に偏光する方法を考案した。そこで偏光素子において散乱されるX線強度の検出角度依存性を利用し、検出器の角度が変更可能なホルダを3Dプリンタにより作製、検出器とX線の偏光方向のなす角が0度および90度のときの散乱X線強度を測定することで、X線の偏光度を評価する簡易装置を作製した。作製した装置を用い、弾性散乱断面積とコンプトン散乱断面積の比が異なる元素で構成される偏光素子からの散乱X線の偏光度を測定することで、X線偏光度と弾性・コンプトン散乱断面積比との間に相関があることを明らかにした。

#### 【3Dプリンタを用いた分光器製作】

その場計測が必要とされる分析には携帯可能な小型分析装置が必要であり、ハンドヘルド型やパームトップ型をはじめとした分析装置のミニチュア化が進んでいる。また近年、3Dプリンタ製ホルダなどの部品を用いた分光分析装置の開発に関する報告がなされており、短時間で高精度な測定が可能な分光器が市販されている。3Dプリンタで用いる入力データは数値制御による機械加工で用いられるデータと同形式の3D CADデータであり、今まで機械加工で行っていた装置製作を3Dプリンタによる簡便な方式にそのまま置き換えることができる。当グループでは、機械加工による金属部品と3Dプリンタによる樹脂部品を組み合わせることで、全反射蛍光X線分析装置や偏光光学系蛍光X線分析装置など種々の光学系を有する分光装置の試作に取り組んでいる。高い精度が要求される部分に対しては金属加工した部品を用いる必要があるが、分析元素に応じて金属部品から生じる妨害ピークを低減するための樹脂製部品、X線管や検出器を固定するためのホルダ、本格的な設計の検討を行うためのプロトタイプ製作に3Dプリンタを活用することは有用であると考え、製作条件が分析精度・感度に及ぼす影響について評価を行なっている。

教授 河合 潤  
助教 田中 亮平

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【ZnSnP<sub>2</sub>太陽電池における裏面電極構造の最適化】

化合物半導体を光吸収層とする薄膜太陽電池において、光吸収層と電極等のヘテロ界面は、高効率化に向けて検討すべき課題の一つである。しかし、20%以上の高い変換効率は数種類の材料の組み合わせでしか達成されておらず、多様な材料研究による普遍的な学理構築が必要と考えられる。一方我々は、光吸収層材料のモデルとしてカルコパイライト型リン化合物半導体 ZnSnP<sub>2</sub>に着目している。これまでに ZnSnP<sub>2</sub>太陽電池では世界最高となる3.44%の変換効率を達成したが、更なる高効率化を目標とし、ヘテロ界面である、ZnSnP<sub>2</sub>/Cu 裏面電極界面の詳細な解析と、その結果を基に裏面電極構造の最適化を行った。

ZnSnP<sub>2</sub>と Cu は 400℃ 以上の熱処理で反応し、接合界面には Cu<sub>3</sub>P が形成されることを見出した。Cu<sub>3</sub>P は ZnSnP<sub>2</sub> とエピタキシャル関係にあり、キャリア輸送の観点からは有利に働くと考えられる。しかし、反応の副生成物である液相 Sn を媒介とし、Cu 電極が凝集してしまうことが分かった。これを防ぐために、Cu<sub>3</sub>P をスパッタリングにより ZnSnP<sub>2</sub> 上に成膜することで ZnSnP<sub>2</sub>/Cu<sub>3</sub>P/Cu 積層構造を作製し、殆ど熱処理を施さずとも低抵抗かつ Ohmic 性を実現した。その結果、変換効率を3.87%に更新することに成功した。

## 【IV 族モノカルコゲナイド単相合成プロセスの開発】

SnS をはじめとする IV 族モノカルコゲナイドは、その物性から太陽電池材料や熱電材料、二次半導体として注目されている。しかし、一般に IV-VI 二元系にはこれらとは異なる組成比の化合物が存在するため、わずかな組成ずれに起因して異相が混入し、単相の合成が難しい。これに対し我々は、Sn-SnS 二相混合物と平衡する Sn、S<sub>2</sub> 蒸気分圧が SnS の蒸気圧と比較して十分低いことに着目し、これを蒸発源とする単相合成プロセスを考案した。

本研究では、バルク結晶と薄膜の双方への応用可能性を検討した。まず、Sn-SnS 二相試料をソースとし、Bridgman 炉を用いた昇華法により cm スケールの SnS 単相単結晶の作製に成功した。SnS は層状構造を有するために結晶は容易に劈開でき、劈開面に平行な方向の正孔移動度は  $100 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$  以上を非常に大きいことが分かった。また、二相試料を蒸着源とした単相薄膜作製にも成功し、Raman 分光と X 線回折による分析の結果、市販の SnS 試薬を蒸着源とした場合よりも高い結晶性を有する薄膜を形成できることを実証した。

## 【統計力学平均の双方向安定性：配位空間上の幾何学が決める非線型性からの定式化と応用】

与えられた potential energy surface: U に対応する熱力学的平衡状態の構造 Q は統計力学平均  $\phi$  を通して知ることができ、順問題である一方、観測した Q の情報から U を決めることは逆問題であり、その安定性は自明では無かった。我々は、Q と U の対応を決める  $\phi$  の写像としての安定性が、 $\phi$  自身の非線型性で決まり、さらにそれが温度や相互作用などの情報無しに配位空間上の幾何学的情報のみで決まるあるベクトル場 D の divergence と Jacobian の和で定量的に記述されることを明らかにした。ベクトル場 D の一般的な傾向として、不規則構造近傍では Jacobian がほぼゼロであり、その振る舞いは divergence でよく記述される。このことと配位空間状態密度の多変数モーメントの情報から、不規則構造近傍で統計力学平均が双方向安定になる領域は普遍的に退化した有心二次超曲面になることを導いた。これにより逆問題の安定性や、相互作用の摂動的な変化に対する構造の安定性などを U、温度の情報無しに定量的に知ることができ、その応用は極めて広範囲に渡る。一方で、ある程度規則化した構造に関する双方向安定領域を知るためには多元多次方程式を解く必要があるが代数的に解けない。そこで現在は、複素領域に解析接続した方程式の解集合の対数写像のある極限での振る舞いを知るために、トロピカル幾何学を応用した解析を進めている。

## 【多元系合金の不規則相の構造の幾何学からの体系的な理解】

不規則相の構造を特徴付ける短範囲規則度 (SRO) は、従来は構成元素の原子半径比などの幾何学的情報では系統的な整理ができなかった。これは一般的に SRO の傾向は、原子半径比に起因した strain の情報に加えて、chemical ordering を決める相互作用に関する情報が必要になるためである。このような背景にも関わらず、我々は配位空間上の幾何学を用いて、構造自由度の揺らぎの情報を取り入れたある特殊な微視的状态のエネルギーと体積に関する情報に基づいた新しい定義の原子半径比を用いることで、多元系合金特有の階層的で複雑な傾向を有する SRO が普遍的に整理できることを明らかにした。すなわち、各階層における SRO (subsystem 基準での二体相関) は、あるしきい値の原子半径比を境にしてその符号が入れ替わること、さらに各階層毎に原子半径比と SRO がほぼ線型相関の関係にあることを見出した。

准教授 野瀬嘉太郎  
准教授 弓削 是貴

工学研究科 材料工学専攻

## 先端材料物性学講座 先端材料物性学分野

### 析出強化多層材料の組織分布の評価

析出強化型のアルミニウム合金の複合材料の材料ならびに熱処理設計のため、多層化したアルミニウム合金板材の組織分布をマイクロビームによる走査小角散乱法により評価した。特性の異なる2種類のアルミニウム合金板の積層化材に対して相互拡散処理により組成勾配を持たせたものを試料とし、人工時効による析出物分布と強度分布の関係を調べた。積層試料の組織分布をAl/AlZn/Al材およびAlMg/AlZn/AlMg3層材で検討した結果、AlMgZn系多層材の場合、相互拡散領域で強度が最大となる条件では引張り変形下で相互拡散領域での亀裂発生から延性に富む周辺領域の塑性変形を経て破壊する過程が観察された。

### MgYZnのLPSO組織におけるクラスター単位構造の安定性と形成過程

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合金に対する放射光での小角高角その場同時測定により、アモルファスMgYZnの結晶化直後は過飽和hcp過飽和微結晶であること、クラスター配列の異方化の進行と同時にhcp回折線の消滅、LPSO化が進行することが示された。このような相転移シーケンスに対し、Mg-RE-TM3元系におけるREの置換効果を検討するため、本年度はRE=Gdとした場合についてアモルファスを始状態とする定速昇温過程の放射光その場測定によって調べた。Gdの場合Yと比較して結晶化直後のクラスターサイズの成長が早いこと、一方LPSO化を示唆するクラスター分布異方性の出現温度はYZn系と大きく違わない事が明らかとなった。これは積層欠陥導入による構造相転移の進行を支配している因子がクラスター成長による歪蓄積ではなく、温度であることを示している。転移温度を決定する要因がStaticなもの(構造相転移駆動力)かKineticなもの(熱活性化過程)かについての検証を進めている。

### BCP薄膜の軟X線GISAXS解析

ミルフィーユモデル系の一候補としてラメラ～シリンドラ構造をとるブロック共重合体薄膜の自己組織形成における膜厚、界面拘束の効果を調べるため、PS-P2VPならびにPS-P4VP系の薄膜のGISAXS深さ分解測定のテストを行い、軟X線領域として入射エネルギー1.3keVおよび2.1keVでの測定結果を12.4keVでの測定結果と比較した。予想していた表面近傍での時間/深さ依存構造変化は得られなかったため、今後基板界面での効果についても検証を進める。

### 貴金属表面への炭素蒸着によって形成されるナノ構造の観察

Au, Agなどに炭素蒸着を行うと、非常に形状の揃った炭素ナノ構造が形成される場合がある。この構造のSTM(走査トンネル顕微鏡)による観察を継続してい

る。これまでの研究からこの構造がC<sub>20</sub>フラーレンの1次元重合体である可能性が考えられる。本年度は基板をAg(111)単結晶からマイカ上のAg(111)薄膜に変更することで試料作製の歩留まりを上げること、および、spring-8の43IRビームラインにおけるex-situでの赤外分光測定の再実験を行った。実験の結果、これまで観察されていた波数と解釈されるピークとこれとは新たに高波数側にピークを観察できた。今回の測定では炭素ナノ構造は2次元アイランドの形状を取っているため、このことによるピーク位置の変化の可能性はある。しかしながら、ex-situでの赤外分光測定法は非常に再現性が悪く、我々の仮説の証明には至っていない状況である。この問題を解決する何らかの方策が求められる。

### 3次元アトムプローブとSTMの複合手法の開発

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。

これまで、Tiシリサイドをmulti-tipとした手法により3次元アトムプローブ試料先端において原子ステップとテラス構造の観察に成功している。本年度はより高空間分解能化を目指し、multi-tipの変更を試みた。Si(111)に少量の炭素を蒸着させた上でSi(111)基板を加熱することで得られるナノアイランドによってSTM探針がイメージされたという報告が過去にあるため、この使用を検討した。実験の結果、ナノスケールのislandは形成されるものの、形状の先鋭化のための条件を最適化すると、バンドギャップが大きくなり、探針としての使用が困難であることが明らかになった。このためW(111)表面へ1~2層Ptを蒸着した表面を加熱することによって得られる(112)ファセット形成に伴うピラミッド構造を次の探針候補とした。W(111)清浄表面を得るための操作を既存の装置で行うことが困難であったため、新たに専用の装置を構成し実験を開始している。

### 劈開法によるさまざまな試料のSTM観察

STMで十分な情報を得るためには原子オーダーで平坦な表面が必要である。このような表面を得る手法の一つとして劈開法があり、この手法をいくつかの物質に適用し観察を行っている。今年度は磁性物理学研究室に試料提供いただき、CoSnS<sub>2</sub>劈開面の観察を行った。この表面の劈開面は最表面の構造の異なる2種類の表面が現れることが明らかになっているが、比較的高確率で両者の中間的な(1原子層の凹凸を持つ)表面が現れる。我々はこの表面において特徴的な電子状態の変化が現れることを見出し、その詳細を実験的に明らかにした。この物質は複雑な磁気的性質を示すことが明らかになっている。現在我々の見出した電子状態密度変化とこれらとの間の関係に注目し、解析を行っている。

准教授 奥田 浩司  
准教授 黒川 修

工学研究科 材料工学専攻

**材料物性学講座  
量子材料学分野****結晶構造のグラフ特徴量に基づいた  
材料物性値予測手法の開発**

近年、機械学習手法を使った効率的な材料探索が多く行われており、様々な対象についてその有効性が示されている。本研究では、結晶構造をグラフ化することで新たな化合物特徴量を考え、それらの有効性を検証した。3つの物性データに対して予測モデルを構築し、グラフ特徴量の性能を検証した。グラフ特徴量を求めるため、配位数や結合を形成する原子間の元素情報の差などにより結合の重み付けを行った隣接行列を計算した。また、無機化合物約18000種類を対象とした凝集エネルギーの第一原理計算結果に対してカーネルリッジ回帰により予測モデルを構築し、テストデータに対する予測精度を評価した。同様の検証を格子熱伝導率の第一原理計算データと融点の実験データに対しても行った。

凝集エネルギーの予測において、グラフ特徴量を加えることで大幅な精度向上が見られた。特に、静電ポテンシャルを考慮したグラフラブラシアン固有値からなる特徴量を用いた場合、最も予測精度が高かった。これはグラフラブラシアンが強結合近似でのハミルトニアンに類似したものとなっており、その固有値を計算することで、凝集エネルギーの予測精度が向上したと考えられる。格子熱伝導率および融点のデータにおいてもグラフ特徴量を加えることで予測精度の向上が見られた。

**推薦システムを用いた並列錯体重合法による  
新規複合酸化物の合成**

新規無機化合物の探索および合成は、既存のものを上回る性能を持つ化合物の発見により、物性発現機構の理解の深化、産業の技術革新に繋がる事が期待される。しかし、実験による新規無機化合物の合成は容易でなく、合成実験を通して効率的に新規化合物を探索する手法の開発が望まれている。本研究では、合成条件と化合物の合成可否が整理された実験結果のデータベースにテンソル分解手法を適用し、実験に成功しやすい条件を推薦するシステムの開発を実施した。

構築した推薦システムを用いて未実験の合成条件およそ65000件の中から推薦を行い上位100条件において実験を試みた。その中の14件において目標の化合物の合成に成功した。ランダムに合成条件を選択した場合は100件中1件のみであった事と比較すると、効率的に擬二元系酸化物の合成に至った。また上記推薦上位100件の中でペルオキソカルボン酸バナジウム、塩化ランタンを1:2の割合で混合し、800および900℃で焼成を行った試料の粉末XRDプロファイルからは既知の無機結晶データベースに登録のない回折プロ

ファイルが得られた。この未知回折プロファイルの結晶構造解析を行ったところ、新規複合酸化物 $\text{La}_4\text{VO}_{11}$ であることが判明した。

**半教師あり学習およびベイズ推定による  
線形回帰ポテンシャルの高精度推定**

第一原理計算に基づいて、機械学習法の1つである線形回帰により原子間ポテンシャルを推定する線形回帰ポテンシャルは、第一原理計算が困難な大規模構造等への適用が期待されている。本研究では、第一に、半教師あり学習を用いて大規模構造に対する予測精度を向上させることを提案した。単体Alからなる多数の構造の一部を学習データとし(110)粒界モデルをテストデータとした際の全エネルギー予測精度を比較した。その結果、数種類の構造群を学習データとした場合において、予測精度が向上した。第二に、ベイズ推定を用いて、エネルギー予測分布を推定することを提案した。ベイズ線形回帰を用いて、単体Alからなる多数の構造の一部を学習し、残りの構造の全エネルギーの予測分布の推定を行った。推定された予測分布が実際の全エネルギーに対して妥当であるか調べるために、マルコフ連鎖モンテカルロ法を用いて、単体Alの様々な構造の一部を学習し、残りの構造の予測分布の推定を行った。全エネルギーの予測分布は尤度を正規分布とするモデルに対して尤度をコーシー分布とするモデルで高精度に推定できることが分かった。

**フォノンボルツマン方程式に基づいた  
 $\text{SiO}_2$ 多形の第一原理熱伝導率計算**

本研究では、 $\alpha$ -quartzおよび $\alpha$ -cristobaliteの格子熱伝導率を第一原理格子熱伝導率計算およびボルツマン輸送方程式にもとづき計算し、熱伝導メカニズムの違いを微視的に解析した。両結晶はc軸方向に異方性を有する。2つの化合物について、熱伝導率の実験方向があり、 $\alpha$ -quartzは熱伝導率に強い方位依存性があることが実験的にわかっていたが、 $\alpha$ -cristobaliteの熱伝導率の方位依存性については実験報告がなかった。

第一原理格子熱伝導率計算による熱伝導率計算結果を実験値と比較すると、 $\alpha$ -cristobaliteについては十分な制度で実験値と一致し、 $\alpha$ -quartzでは多少過少評価したものの熱伝導率の方位比は実験値をよく再現した。さらに、両結晶の熱伝導率に強い方位依存性が生じていることがわかった。また、熱伝導率に寄与するフォノン振動数領域において、 $\alpha$ -quartzが $\alpha$ -cristobaliteに比べ、フォノン緩和時間が長いことがわかった。本研究での研究成果は、将来、格子熱伝導のメカニズムを解明するために重要な役割を果たすものと考えられる。

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

#### FCC 構造を有する Cr-Mn-Fe-Co-Ni 高エントロピー合金の機械的特性に及ぼす合金組成の影響

高エントロピー合金 (HEA) とは 5 種類以上の構成元素をほぼ等原子量ずつ含み、配置のエントロピーの寄与により安定化される単相固溶体合金であり、なかでも FCC 構造を有する Cr-Mn-Fe-Co-Ni 等原子量 HEA 多結晶材は高強度と高延性・高靱性を兼ね備えるため注目を集めている。本研究では様々な組成を有する Cr-Mn-Fe-Co-Ni 非等原子量合金単結晶の圧縮および引張試験を行うことにより変形挙動ならびにすべり変形の臨界分解せん断応力 (CRSS) の組成と温度依存性を、さらに変形後の転位組織観察により積層欠陥エネルギーの組成依存性を実験的に調査し、強度、延性に及ぼす積層欠陥エネルギーや平均原子変位量の影響についての様々な基礎的知見を得た。

#### セメンタイトおよびパーライト単結晶の マイクロピラー圧縮変形

各種鉄鋼材料の中でも随一の強度を有するパーライト鋼はフェライトとセメンタイトが交互に積層したラメラ構造を有し、伸線加工によりラメラ間隔が微細化することで強度が著しく向上するとされているが、その詳細は十分には理解されていない。本研究では伸線加工パーライト鋼の組織形成と高強度化に重要な役割を担うと考えられるセメンタイトの塑性変形能を単結晶マイクロピラー圧縮試験により調査した。その結果、室温における 5 種類のすべり系の活動を同定するとともにそれらの CRSS の値を実験的に明らかにすることに成功し、これらの活動により von Mises の条件が満たされることを確認した。また単一のラメラ配向を有するパーライト粒の複相単結晶マイクロピラー圧縮試験を行い、単結晶の塑性変形に関する知見を基にパーライト鋼の変形挙動について考察を行った。

#### TM<sub>5</sub>Si<sub>3</sub> (TM=Ti, Nb, Mo) 型遷移金属シリサイドの マイクロピラー圧縮変形

2000 °C を超える高融点で優れた高温強度を示す TM<sub>5</sub>Si<sub>3</sub> 型遷移金属シリサイドは Ni 基超合金に替わる超高温構造材料の候補として有望視されているが、その塑性変形挙動は 1000 度を超える高温域で観察されるのみで、またそれらの詳細については未だ不明な点が多い。そこで本研究ではバルクでは脆性的な性質を示す結晶性材料の塑性変形挙動評価に有効な方法であ

る単結晶マイクロピラー圧縮試験法により、六方晶系 D8<sub>8</sub> 型構造を有する Ti<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>、正方晶系 D8<sub>1</sub> 型構造を有する α-Nb<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>、正方晶系 D8<sub>m</sub> 型構造を有する Mo<sub>5</sub>Si<sub>3</sub> の室温塑性変形挙動の調査を行った。その結果、Ti<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>、α-Nb<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>、Mo<sub>5</sub>Si<sub>3</sub> においてそれぞれ 3 種、2 種、1 種のすべり系が室温で活動可能であること、また同定したすべり系の CRSS のサイズ依存性を明らかにした。得られた結果を基に TM<sub>5</sub>Si<sub>3</sub> 型遷移金属シリサイドの室温塑性変形能の支配因子について考察を行った。

#### HCP-Ti 単結晶のマイクロピラー圧縮変形

近年、結晶性材料の力学特性を評価する新しい方法としてマイクロピラー圧縮試験が注目され、FCC 金属や BCC 金属を中心これまで多くの研究がなされ、変形応力のサイズ依存性などの特異な現象が報告されてきた。本研究では塑性異方性が強い HCP 金属の Ti について単結晶マイクロピラー圧縮試験を行い、マイクロメーターサイズ領域における Ti の塑性変形挙動についての調査を行った。その結果、a 軸圧縮ではバルク試験と同様の柱面すべりの活動を確認した一方で、c 軸圧縮時にはバルク単結晶の圧縮試験で見られる  $[11\bar{2}]$  変形双晶ではなく、錐面すべり上の c+a 転位の運動により塑性変形することを確認し、試料サイズに依存して変形モードの遷移が生じることが明らかとなった。同定した 2 種類のすべり系の CRSS の値はいずれもサイズ依存性を示したが、CRSS の値が低い柱面すべりのほうが強いサイズ依存性を示すことを明らかにした。

#### (Fe,Ni)<sub>2</sub>Nb ラーベス相化合物単結晶の マイクロピラー圧縮変形

六方晶系 C14 型構造を有する Fe<sub>2</sub>Nb ラーベス相化合物は耐熱鋼などにおける新規強化相として注目されているが、その変形挙動は複雑な結晶構造に起因して脆性的であるとされていた。近年、Fe の一部を Ni で置換した (Fe,Ni)<sub>2</sub>Nb 相のナノインデンテーション試験により室温におけるすべり変形の活動が示唆されたものの、詳細は十分には理解されていなかった。本研究では様々な Ni 組成を有する (Fe,Ni)<sub>2</sub>Nb 相について単結晶マイクロピラー圧縮試験を行い、(Fe,Ni)<sub>2</sub>Nb ラーベス相化合物の室温塑性変形挙動に及ぼす Ni 組成の影響についての調査を行った。その結果、Ni-rich 組成 (Ni ≥ 30at.%) を有する (Fe,Ni)<sub>2</sub>Nb においてのみ底面すべりの活動による塑性変形を確認した。

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****マルテンサイト分布状態の異なる Dual-Phase 鋼の  
変形挙動**

軟質なフェライト相と硬質なマルテンサイト相で構成される Dual-Phase (DP) 鋼は、強度と延性のバランスに優れ、構造用材料として幅広く利用されている。本研究では、フェライト粒界にマルテンサイト相が鎖状に連なった分布状態を有する連結型 DP 材とフェライト母相中にマルテンサイト相が島状に分布する孤立型 DP 材の二種類の試料を作製し、マルテンサイトの分布状態が DP 鋼の変形挙動に与える影響を調べた。引張試験により力学特性を評価したところ、連結型 DP 材の方が優れた均一伸びと局所伸びを示すことがわかった。この要因を明らかにするため、デジタル画像相関法によって引張変形中のひずみ分布を測定し、また引張試験中のその場中性子回折実験によって各相における応力分配を評価した。その結果、孤立型 DP 材と比較して、連結型 DP 材ではフェライト相とマルテンサイト相がより均一に変形することによってひずみ集中が抑制されていることが明らかとなった。このひずみ集中の抑制が連結型 DP 材の優れた延性の要因であると考えられる。

**2Mn-0.1C フェライト鋼の水素脆性破壊挙動**

水素脆性とは、材料中に水素が侵入することでその材料の力学特性が著しく劣化する現象である。高強度マルテンサイト鋼は水素脆化感受性が高く、マルテンサイト鋼の水素脆化挙動に関して多くの研究がなされている。しかし、これまでに報告されている水素脆性破壊の特徴が、マルテンサイト組織に由来するものなのか水素脆性破壊の本質的なものは明らかになっていない。そこで本研究では、マルテンサイト組織と同じ BCC 構造であり単純な組織を有するフェライト鋼の水素脆性破壊を調べ、BCC 鋼の水素脆性破壊の本質を検討した。フェライト鋼の水素脆性破壊様式は主に {011} 面に沿った擬へき開破壊であった。マルテンサイト鋼の水素脆性擬へき開破壊も {011} 面に沿って進展するため、BCC 鋼の水素脆性破壊においては {011} 面が共通して重要な役割を果たすことがわかった。種々のひずみ量での変形組織を詳細に解析したところ、塑性変形後期において、転位セル境界を構成している転位密度は水素チャージ材の方が高く、水素によって転位運動が活発になっていくことが明らかとなった。以上の結果から、水素によって活発になった転位運動に伴い多量の空孔が導入され、さらに水素の存在によって安定化された空孔が {011} すべり面上にポイドを形成し、ポイドが連結することによって {011} 面に沿った水素脆性破壊が生じることが示唆された。

**3Mn-0.1C 中 Mn 鋼における加工熱処理による  
組織形成とその力学特性**

近年、優れた強度・延性を有する中 Mn 鋼 (Mn 量: 3~10%) が次世代の高強度低合金鉄鋼材料として注目されている。本研究では、比較的 Mn 濃度が低く、実用材料としての適用が期待できる 3Mn-0.1C 中 Mn 鋼を用い、オーステナイト+フェライト二相域における加工熱処理中の組織形成過程および室温力学特性を系統的に調べた。マルテンサイトを出発組織とした場

合、圧縮加工によってオーステナイト逆変態が大きく促進されること、そして加工温度によって逆変態オーステナイトの安定性が変化することが明らかとなった。種々の温度での加工熱処理後の試料に対して室温引張試験を行ったところ、フェライト+残留オーステナイト+マルテンサイトの混合組織が最も優れた室温力学特性を示すことがわかった。これは、残留オーステナイトの変形誘起マルテンサイト変態によるものと考えられる。また、オーステナイトを出発組織とした加工熱処理では、加工中に動的フェライト変態が生じることによって、微細なフェライト+マルテンサイトの二相組織が形成されることが明らかとなった。得られた微細なフェライト+マルテンサイト二相組織は、残留オーステナイトが存在しなくても優れた強度・延性バランスを示すことがわかった。

**高温加工熱処理された鉄含有純チタンにおける  
超微細粒組織の形成と力学特性**

鉄は純チタンの製造時に必ず混入する不純物であると同時に、チタンにおける BCC- $\beta$  相を安定化する元素である。これまでに我々の研究室では、 $\alpha+\beta$  二相域での簡便な加工熱処理によってチタン合金の結晶粒を微細化できることを明らかにしてきている。そこで本研究では、 $\beta$  相安定化元素である鉄を 0.25~1.0wt.% 含むことによって  $\alpha+\beta$  二相域が拡大した純チタンを用い、 $\alpha+\beta$  二相域加工熱処理中の組織形成過程および室温力学特性を系統的に調べた。変形温度の上昇およびひずみ速度の低下に伴って  $\alpha$  相の結晶粒が粗大化し、残留  $\beta$  相の体積分率が増加することがわかった。残留  $\beta$  相の増加は、加工熱処理中の  $\alpha$  相から  $\beta$  相への鉄原子の拡散 (合金分配) が促進されたためであると考えられた。また、 $\alpha$  相の結晶粒径および  $\beta$  相の体積分率が室温力学特性に大きな影響をおよぼすことがわかった。特に  $\beta$  相の体積分率が高い場合、 $\alpha$  相の結晶粒が粗大であっても、高い強度と十分な延性を示すことが明らかとなった。

**HfNbTaTiZr ハイエントロピー合金の  
高温加工熱処理における変形機構と組織形成**

ハイエントロピー合金は、5種類以上の元素をほぼ等モル量ずつ混合した、高い配置エントロピーを有する合金である。本研究では、高融点 HfNbTaTiZr ハイエントロピー合金の高温加工熱処理における組織形成過程と変形挙動を系統的に調べた。詳細な組織観察より、高温変形時に動的再結晶が発現し、初期粒界に生じるバルジングが微細な動的再結晶粒の形成につながっていることを明らかにした。また、微細動的再結晶粒と粗大な未再結晶初期粒からなる不均一ネットワーク組織が粒界すべりを起こしていることを見出した。一方、種々の平均粒径 ( $6\mu\text{m}$ ~ $50\mu\text{m}$ ) の均一再結晶組織を有する試験片を作製し、引張試験により室温力学特性を調べた結果、通常金属で観察される結晶粒微細化強化が、本合金ではほとんど見られないこと、また降伏後の加工硬化が顕著に抑制されることを見出した。これらはいずれも、従来金属の常識に沿わない特異な現象である。

教授 辻 伸泰  
准教授 柴田 暁伸  
講師 高 斯 (Gao Si : 2019年3月着任)  
助教 白 玉 (バイ・イ)  
ESISM特定助教 朴 明駿

工学研究科 材料工学専攻

### 先端材料機能学講座 先端材料機能学分野

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

#### 物理現象に基づく画像解析技術の開発

4D-CTを用いた直接観察では、三次元像を得るために透過像を再構成することが必要である。しかし、再構成によって画像にノイズが付加され、本来の固液界面形状を再現するには困難があった。そこで、本研究室ではフェーズフィールドの概念に基づく画像解析手法を開発し、Al-Cu合金の直接観察の結果に画像処理を行うことで固液界面の曲率から必然的な界面形状を得ることに成功した。これにより、三次元の組織を定量的に観察・測定できるようになった。また、鋳鉄においても力学特性に影響するグラファイトの形状を支配する因子を時間分解・その場観察を用いて明らかにしている。Ni基超合金や軽金属においても、凝固過程における組織形成を実証的に明らかにした上で工学的応用を目指している。実用材料に加えて、ハイエントロピー合金の凝固過程の解析も行っている。

#### 時間分解・その場観察によるFe系合金の マッシュ的変態現象の評価

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

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

#### X線イメージングを用いたハイエントロピー合金の 凝固現象の定量解析

5種類以上の元素が等モル分率で混合したハイエントロピー合金の凝固現象に関して、従来の溶質濃度の小さい合金や母相に高濃度に溶質が添加された高合金との類似点や相違点は不明である。そこで、SPring-8の高輝度X線による蛍光X線その場測定を用いて、CrMnFeCoNiハイエントロピー合金の固液界面での各元素の分配を定量的に評価した。また、熱分析により固相線温度と液相線温度を決定した。実験結果から、凝固パスに沿った形でCrMnFeCoNiハイエントロピー合金を擬二元系としてみるのが可能であることが分かった。従来合金の凝固組織形成との類似点、相違点についても4D-CTによる解析を行っている。

#### Al-Cu合金の固液共存体の変形の三次元解析

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

教授 安田 秀幸  
助教 鳴海 大翔

工学研究科 材料工学専攻

材料機能学講座  
磁性物理学分野

## M型フェライトのAサイト置換効果

高性能フェライト磁石の母材であるLa-Co置換M型フェライト( $\text{AFe}_{12}\text{O}_{19}$ , A=Sr, Pb, Ba)のさらなる高性能化を目指し、本系における結晶磁気異方性の電子論的な起源の解明が行われている。従来の解釈では、酸素八面体配位 $\text{Co}^{2+}$ の電子配置の結晶場分裂から考えられる残留軌道モーメントが磁気異方性増強の要因と考えられていたが、最近の我々の研究から、Coの主たる占有サイトは酸素四面体配位サイトであり、磁気異方性は $\text{Co}^{2+}$ と酸素イオンとの軌道混成により復活する軌道モーメントによるものであると考えられる。一方で、同じCo置換濃度であっても、Aサイトカチオンが異なる系で著しく磁気異方性が異なっており、Aサイトカチオンが間接的に磁気異方性に与える効果に興味もたれる。

本研究では、 $\text{Co}^{2+}$ の導入の際に電荷補償のために加えられている $\text{La}^{3+}$ についてCeに置き換えられるかどうかを検討した。Laの代替としてのCeについてはわずかな報告があるのみであり、従来Ceは4価でM相に置換すると期待されていたが、我々の研究からは3価で置換することが明らかとなった。また、Ceの価数の不安定性から固溶域が他の希土類イオンに比べ小さいことが明らかとなり、磁気異方性に大きな影響を及ぼすほど置換を進めることができないことが判明した。

 $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ における異常な磁気緩和現象

近年、カイラル秩序という非共線的、共面的な磁気構造を有する磁気秩序状態が注目されている。このような磁気構造はジャロシンスキー守谷相互作用や幾何学的フラストレーションに起因し、我々はそれらを内包している可能性のあるカゴメ格子強磁性体 $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ に着目している。

$\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ は一軸異方性の大きな遍歴電子強磁性体であり172 K付近にキュリー温度が存在する。最近我々は、キュリー温度直下の弱磁場領域において、磁化および交流磁化率の温度依存性に異常が現れ、磁気異常相の存在が示唆されることを見出した。その磁気異常相内においては、非常に遅い磁気緩和現象が観測され興味もたれる。この磁気異常相について微視的な磁性の知見を得るため、 $^{59}\text{Co}$ -核磁気共鳴実験を行った。

強磁性体の核磁気共鳴信号は磁壁の運動からの増強を受けるが、本系においても増強効果が観測された。また特徴的なことには、二種類の増強因子の存在が観測され、磁壁の空間的に異なる部分の信号が観測され

ていると考えられる。一方の信号については縦緩和率、横緩和率ともに磁気異常相と通常の強磁性相との間で異常は観測されなかったが、もう一方の信号については横緩和率が相境界で発散し、信号の消失が見られた。これは、通常の強磁性相と磁気異常相の境界において磁壁の運動が活発化している事を示唆し、温度による磁区組織の組み替えが起こっているものと考えられる。

フラストレート磁性体 $\text{ZnFe}_2\text{O}_4$ における  
スピングラス様磁性の発現

スピングラスとは、正負のスピン間相互作用がランダムに混在する系が示す“スピンがランダムな方向を向いたまま凍結した”状態のことで、そのスピンの空間配列は如何なる周期性も持たないものの、高温の無秩序相が持つ対称性が破れた秩序状態である。通常、スピングラスはランダム系特有の秩序状態と考えられているが、スピンの奇数ボンドループを内蔵するフラストレート磁性体では、顕なランダムネスが無くともスピングラス様磁性を見せる物質がある。そのようなフラストレート磁性体の典型例の一つとして、スピネル化合物 $\text{ZnFe}_2\text{O}_4$ があり、単結晶試料をフラックス法で育成し、そのスピングラス様磁性を詳細に調べた。

育成した単結晶の構造解析から、ZnとFeが一部(10%程度)交互置換されていること、その交互置換量は仕込み組成や酸素分圧などに影響を受けること、などが分かった。育成した $\text{ZnFe}_2\text{O}_4$ 単結晶の磁気状態は、(i)高温域( $T > 200 \text{ K}$ )の常磁性状態、(ii)中間温度域( $16 \text{ K} < T < 200 \text{ K}$ )の数個程度のFeスピンが強く結合したスピングラス状態がスローダイナミクスを示す超常磁性状態、低温域( $T < 16 \text{ K}$ )のランダムなスピン配列の相関(ガラス相関)が発達したスピングラス状態、と3つに分かれることが分かった。このうち、(ii)の超常磁性状態はZn/Feの交互置換量によって現れる温度域などが強く影響を受けることから、結晶の不完全性によるランダムネス起源であることが示唆される。また、(iii)のスピングラス状態のガラス相関は通常のスピングラス同様 $N \sim 10^4 - 10^5$ 程度にまで発達するものの、時間無限大の極限(熱平衡極限)でもNは緩やかな温度変化を示すこと、即ち熱平衡相関長が発散しないこと、またそれに対応してスピングラス感受率である非線形磁化率の発散も観測されないことから、 $\text{ZnFe}_2\text{O}_4$ のスピングラス状態は秩序相として現れているのではなく、本質的には対称性の破れを伴わないスピン液体状態であり、そのスピン揺動が極めて遅くなった結果の非平衡スピン凍結状態であると考えられる。

教授 中村 裕之  
准教授 田畑 吉計  
助教 和氣 剛

工学研究科 材料工学専攻

材料機能学講座  
材質制御学分野

### 添加剤の協働作用による金属 Li の平滑電析

次世代の二次電池の負極として注目される金属 Li は、析出する際にデンドライト状に成長するため、電池の容量の低下や発熱・発火する恐れがある。このような機能面及び安全面での課題のために、金属 Li 二次電池は実用化には至っていない。

本研究では、2-Butyne-1,4-diol, 2-Naphthol, Saccharin, Diacetone acrylamide の 4 種の化合物を一斉に添加したグライム系電解液において、金属 Li の平滑電析が可能であることに着目し、電気化学と水晶振動子マイクロバランス (QCM) の同時測定、並びに表面の X 線光電子分光分析から各添加剤の役割を調べた。また、それらの添加量が充放電効率に及ぼす影響を検討した。

モル組成 Tetraglyme : Li(Tf<sub>2</sub>N) = 4 : 1 (Tf = CF<sub>3</sub>SO<sub>2</sub>) の溶液を基本とし、先に述べた添加剤を 3 種類および 4 種類添加した電解液計 7 種類を調製し、サイクリックボルタンメトリー (CV) と QCM の同時測定 (EQCM) を行った。CV で測定した電流が全て Li の析出溶解に起因するものと仮定して計算した質量変化に比べて、実測した質量変化の方が大きいという結果を得た。5 サイクル目で計算値と実測値が一致することから、CV 初期は金属 Li ではなく Li 化合物 (Solid-Electrolyte Interphase: SEI) の形成が進行し、サイクル数を経ると SEI 形成が安定して金属 Li が効率的に析出し始めることが分かった。また、Diacetone acrylamide が金属 Li の効率的な溶解に寄与していることが分かった。

充放電試験では、2-Naphthol, Diacetone acrylamide の 2 種添加剤が最適であるという結果を得た。それぞれの電析物の表面組成を分析した結果、上述の 2 種添加剤で形成した電析物表面には多く炭酸リチウムが SEI として存在し、この SEI が効率的な充放電を可能にすることが分かった。

### 格子欠陥を有する 3C-SiC の腐食機構

silicon carbide (SiC) は化学的・物理的安定性が非常に高いために、原子炉燃料容器 (原子炉燃料被覆管) の代替材料として注目されている。原子炉中では中性子による材料への欠陥生成が材料の性質を変化させることが知られている。SiC もその例に漏れず、格子欠陥生成によって腐食量が增大するという報告がある。しかしこの現象については、腐食量の増減といった現象の調査のみがなされ、詳細な腐食機構の検討はなされてこなかった。そこで本研究では単結晶 3C-SiC へ格子欠陥を導入し、その電気化学挙動の調査を行い、格子欠陥と腐食の関係について検討を行った。

試料には N, B, Al ドープおよび、ドープなしの 4 種の単結晶 3C-SiC を用いた。この試料に対して 5.1 MeV Si<sup>2+</sup> イオンを照射し、中性子による欠陥生成を模擬した。欠陥を生成した試料についての電気化学測定は室温・大気圧下で行い、電解液には 21 mM HF + 12 mM

NH<sub>4</sub>F + 0.965 M NH<sub>4</sub>Cl を用いた。得られた分極曲線から腐食電位・腐食電流を求め、欠陥量・ドープ濃度が電気化学挙動に及ぼす影響を検討した。

イオン照射による格子欠陥生成によって、腐食電位がまず貴へシフトし、さらに欠陥量が增大すると、大きく卑へシフトした。腐食電位が卑へシフトするとき、腐食電流が大きく増大した。この挙動は N, B ドープおよびドープなしの SiC に共通して見られた。一方で、Al ドープ SiC では腐食電位の貴へのシフトのみが確認され、卑へのシフトが見られず、腐食電流の顕著な増大も確認されなかった。このことから、Al ドープ SiC は格子欠陥導入による腐食の進行が抑えられていると考えられた。また XPS よりイオン照射によって SiC 表面で炭素由来の層の形成が確認された。この層の安定性の違いが SiC の腐食の進行に大きく関与することがわかった。

### 濃厚水溶液を用いた Al の電解エッチング

本研究では、電位窓の広い水系電池電解液として注目されている濃厚 (21 mol kg<sup>-1</sup>) LiTf<sub>2</sub>N 水溶液 (Tf = CF<sub>3</sub>SO<sub>2</sub>) 中での金属 Al の酸化挙動を調べた。従来の報告よりも貴な電位での電解によって、導電性を持ち、黒色外観のポーラス体が形成することを見出した。試料断面の TEM-EDX 分析により、ポーラス体の骨格が金属 Al であり、酸素は自然酸化皮膜としてのみ存在することがわかった。このように、金属 Al を濃厚 LiTf<sub>2</sub>N 水溶液中で酸化すると、厚い酸化物層が生成する陽極酸化反応ではなく、スポンジ状球型ピットが形成する電解エッチングが起こることを明らかにした。

通常の電解エッチングは Cl<sup>-</sup> など腐食性の強いハロゲン化物イオンの集中による腐食によって起こるが、むしろ Tf<sub>2</sub>N<sup>-</sup> アニオンは Al により還元分解されて不働態膜を形成するはずである。また、従来のエッチングによるピット形状は、直流電解で四角いトンネル状、交流電解でスポンジ状のキューブ型である。よって、濃厚 LiTf<sub>2</sub>N 水溶液中の直流電解でスポンジ状の球型ピットが得られたということは、ピット形成機構が大きく異なることを示唆する。

スポンジ状ピットは H<sub>2</sub>O と Tf<sub>2</sub>N<sup>-</sup> の両方が存在する電解液を用いた場合のみ形成した。また低濃度の場合にはスポンジ状ピットの形成が不完全であった。電解による pH 変化に着目したところ、酸素発生に伴う H<sup>+</sup> 生成によりアノード付近で強酸性領域が生じることを確認した。また電解前の濃厚 LiTf<sub>2</sub>N 水溶液は弱酸性であり、Al を浸漬しただけではピットが形成しないことがわかった。

以上より、酸素発生で生じる H<sup>+</sup> が不働態膜を化学溶解し、Al の活性溶解が可能になる低 pH 領域と、H<sup>+</sup> 消費により不働態膜が再び生成する高 pH 領域とが空間的に変動して、スポンジ状球型ピットが形成すると考察した。また Tf<sub>2</sub>N<sup>-</sup> アニオンの分解物 (AlF<sub>3</sub>, Al<sub>2</sub>S<sub>3</sub>) の H<sup>+</sup> との反応性の違いもランダムポアの形成要因であると考えた。

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

## 酸化グラフェンアシスト Si 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。本研究ではGOの酸素・過酸化水素還元触媒機能を活用することで、GOアシストSiエッチングが可能であるか調査した。GOシートを、水素終端化処理を施したSi(111)基板上に担持した。その後、フッ化水素酸(HF)と過酸化水素水(H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)の混合液(体積比1:1)に25℃で浸漬した。16時間浸漬した試料の原子間力顕微鏡(AFM)像では、シートに由来する10nm前後の凹部が観測された。GOがSi基板に沈み込んでいることが確認され、GOアシストSiエッチングが可能であることを実証した。

## 電気化学AFMによるSi電極-イオン液体界面の構造分析

リチウムイオン電池(LIB)の負極材料として、Siが注目されている。エネルギー密度が一般的に使われているグラファイトより10倍ほど大きい特徴があるものの、充電時のLi<sup>+</sup>イオン挿入による体積膨張でSiが微粉化するため、サイクル寿命が短いという問題点がある。解決には、Si電極-電解質界面で起こるSiの体積変化の構造を解析し理解することが不可欠である。原子間力顕微鏡(AFM)は測定環境に対する制約が少なく、固液界面の解析手法として注目されている。本研究では、Li塩添加イオン液体中でSiをLi<sup>+</sup>イオン挿入電位に設定した電気化学環境下で*in situ* FM-AFM測定を行なった。その結果、Si(111)由来のステップテラス構造を確認しながら、表面に突起物が生成されることが明らかになった。また、Li塩添加イオン液体/H-Si界面の2Dフォースマッピングを行なったところイオン液体/H-Si界面で確認された溶媒和構造が現れないことが明らかになった。

## 酸化グラフェンのhard VUV光還元

当研究室では中心波長172nmのキセノン(Xe)エキシマランプを用いた酸化グラフェン(GO)の真空紫外(VUV)光還元を報告してきた。より低波長のhard VUV光領域(100~160nm)を用いれば、より高い励起状態を介した光化学反応を誘起できると期待される。本研究ではGOをSi基板上に担持し、真空チャンバー(<10<sup>-3</sup> Pa)内で各種VUV光を照射することで作製したGO還元体(rGO)の物性を調査した。Hard VUV光源には126nmと160nmにピークを持つ重水素(D<sub>2</sub>)ランプを用いた。D<sub>2</sub>ランプ照射したrGO試料ではXeエキシマランプ照射の場合と比較し

て、電気伝導度、キャリア移動度共に一桁の向上が確認された。光還元反応のさらなる進行や炭素欠陥の部分的な修復が示唆された。

## 液体金属-固体界面構造の原子レベルAFM解析

原子間力顕微鏡(AFM)は多くの材料表面の高分解能観察に用いられており、特に液中環境下では固液界面の3次元微視的構造解析手法として注目されている。当研究室では、探針先端のみを液中に浸漬させるというアイデアを元に、従来のシリコンカンチレバーでは不可能な光学的に不透明な液体金属中で動作するAFMを開発し、研究を行なっている。本研究では合金化を引き起こす液体金属-固体界面の原子スケール構造解析を目的とした。

液体金属としてGallium単体(融点30℃だが、過冷却で室温でも液体)、固体基板としてマイカに金を蒸着したものをを用いた。目視の観察から液体Gallium滴下後数10分ほどで合金化を起こすことが確認できた。この界面をAFMで観察した結果、平滑な面を持った結晶粒が成長していることが確認できた。状態図からはAuGa<sub>2</sub>の形成が期待された。平滑な面の高分解能観察を行うとステップテラス構造及び6回対称の輝点が観察され、これはAuGa<sub>2</sub>(111)のAuGa<sub>2</sub>単位の面間隔及びAuまたはGaの配列と一致した。以上からAuGa<sub>2</sub>の形成と(111)面の高い安定性が分かった。

## チタンと高分子材料のVUV表面活性化接合

当研究室では、VUV表面改質したCyclo-Olefin Polymer(COP)フィルムとシリコン基板またはアルミニウム箔の有機-無機異種材料接合に成功した。特に、原子スケール平滑なシリコン基板は室温でもCOPと接合できた。本研究では、異種材料接合における平滑表面や表面状態の効果をチタンにて実証することを目的とした。

Hexadeceneを前駆体としたSelf-Assembled Monolayer(SAM)を成膜したシリコン単結晶をテンプレートとし、template stripping(TS)法を用いて平滑なチタンを作製した。作製したチタンとVUV照射したCOPの被照射面を貼り合わせ、室温で圧着した。その後各試料の90度剥離試験で接合強度を調査した。高平滑な表面を持つTS-TiとCOPの室温接合では8.8N cm<sup>-1</sup>という強度が得られた。TS-TiとCOPはどちらも非常に平滑であり、室温でも界面の有効接触面積が大きいため、接着剤フリー室温接合できたと考えられる。また、より粗い蒸着チタン(PVD-Ti)では、材料表面に酸素含有官能基を持つ分子膜を導入することによって、COPとの室温接合に成功した。

教授 杉村 博之  
准教授 一井 崇  
助教 宇都宮 徹

工学研究科 材料工学専攻

## 非鉄製錬学講座

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

## 非鉄製錬プロセスに関する基礎研究

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

黄銅鉱の酸化浸出機構と亜鉛の電析機構に関する基礎研究に継続して取り組むとともに、昨年度より使用済みリチウムイオン電池(廃LIB)とE-scrapを対象とした新規リサイクル技術の研究開発を開始した。廃LIBは、活性リチウムを含む。そのため、今後、特に車載用の大型LIBのリサイクルを推進するには、適切な失活解体プロセスを確立する必要がある。本研究室ではそのための要素技術開発に取り組んでいる。また、E-scrapのリサイクルについては、既存技術では資源ロスの大きい錫に注目し、その効率的な抽出分離法の開発を行った。その結果、ヨウ素のオキソイオンを酸化剤とする新たな浸出法の開発に成功しており、現在はその特異的に高い反応性能の起源の解明に取り組んでいる。

## 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

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。

昨年度、2018年秋に、第1期の教育プログラムが終了した。第1期には、7社より計14名の受講者が参加した。また、2018年秋からは、12社より計19名の受講者を迎え、第2期のプログラムを開始した。本プログラムは、熱力学や電気化学に関する4つの科目で構成されており、受講生はインターネットを利用して必要ときに何度でも講義を視聴することができる。また、前期・後期の最後には、京都大学や京都近郊のセミナーハウスにて期末試験が行われ、各科目の習熟度を確認できることも特徴である。2019年の秋からは、産官の若手技術者を迎えて、第3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。2018年度は、京都大学 ELCAS への協力として、実験実習「金・銀・銅を作ろう!」を行った。

教授(兼任) 宇田 哲也  
特定准教授 谷ノ内勇樹  
特定助教 岸本 章宏



図1 寄附講座の活動

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 (2019年8月現在)**

博士課程学生4名(内留学生タイ, インドネシア, カンボジア, フィリピンから各1名), 修士課程が13名(内留学生 インドネシアから1名, 中国から1名, 米国へ留学中1名), 学部学生6名にスタッフ5名を加えて総勢28名(内女性3名). イランから研究生が1名. 6~7月にはタイから短期留学生在が1名滞在中, 研究室のセミナーも英語で行うなど, グローバルな環境の下, 研究を行っている.

**最近の研究から**

2019年3月に学位を取得した Hien-Tien Lin 君の研究について紹介する.

本研究は, 島嶼地域における廃棄物処理, 特に近代都市を有するにもかかわらず適正な処理施設を設置するには規模が小さい台湾金門島において, 一般廃棄物, 廃自動車, 廃家電を対象に最適な処理方法を検討した.

- 1) 一般廃棄物: 現在は台湾本島へ輸送し, 大都市の廃棄物と一緒に高度な処理をしているが, 輸送費, 処理費用を調査すると台湾本島の処理費用と比較

して2倍程度を金門県が負担している. そこで, 持続可能な処理方法として金門島内で RDF (廃棄物固形燃料) を製造し輸送することにより, 輸送費用の削減と付加価値を付与し, 総費用の削減が可能であることを見出した.

- 2) 廃自動車: 現在, 一部島内で解体した後, 本島へ輸送しているが, 解体費用および輸送費用が高つく, 不法投棄が多く発生している. この問題に対応するためには, 解体費用の援助もしくは全数の直接輸送費用を生産者が補助するシステムの構築が不可欠であることを示した.
- 3) 廃家電 (テレビ, 洗濯機, エアコン, 冷蔵庫): 金門島の安い労働力を利用し予備解体することにより輸送費の削減が図られ, より効率的なリサイクルが可能であることを示した (図1).

以上の議論を通じて, 予備処理と輸送の最適化, および台湾本島の高効率リサイクルプラントを有効利用することにより費用削減が図られ, 持続可能な処理方法となりうることを示した. また, 島嶼地域で同様の議論が成立する範囲についても考察を行った.

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

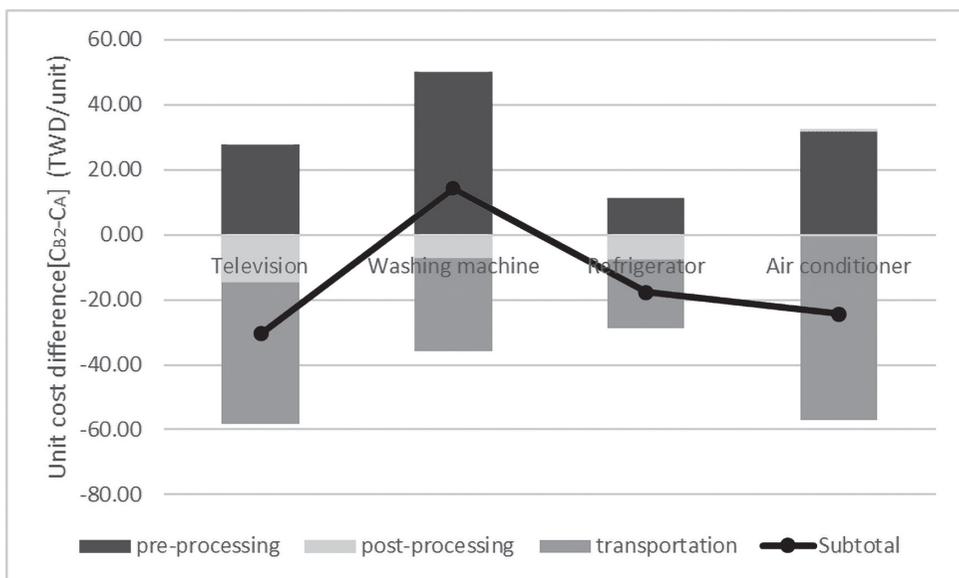


図1 従来と比較した予備解体モデルのコスト. 洗濯機は有価物が少なく予備解体のメリットがほとんどないことがわかる.

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

### 金属硫化物ナノ構造体の作製と太陽電池への応用

硫化アンチモン ( $\text{Sb}_2\text{S}_3$ ) ナノ構造体を作製し、隣接層との接触面積を大きくすることによる電荷分離効率の向上と、太陽電池の発電効率の向上を検討した。硫黄源として硫化ナトリウムあるいはチオアセトアミド、potassium *o*-benzylthiocarbonate ( $\text{C}_7\text{H}_8\text{CSSK}$ ) を使用し、溶媒には純水およびエチレングリコールを使用して Solvothermal 法により  $\text{Sb}_2\text{S}_3$  ナノ構造体を作製した。硫黄源として硫化ナトリウム、溶媒にエチレングリコールを用いて作製した場合、一辺  $1.52\ \mu\text{m}$  のマイクロ立方体が得られた。また硫黄源としてチオアセトアミド、溶媒に純水を使用した場合、長さ  $2\ \mu\text{m}$  のマイクロロッドが得られた。一方、硫黄源として  $\text{C}_7\text{H}_8\text{CSSK}$ 、溶媒に純水を使用した場合、長さ  $680\ \text{nm}$  のナノロッドが得られた。硫黄源としてチオアセトアミドおよび  $\text{C}_7\text{H}_8\text{CSSK}$  を使用した場合、直接遷移バンドギャップは  $1.6\text{--}1.7\ \text{eV}$  であり、可視光波長領域での吸収が確認された。また光電子スペクトルから価電子帯は  $5.6\text{--}5.8\ \text{eV}$ 、伝導帯は  $4.0\ \text{eV}$  に位置することがわかった。純水中で硫黄源に  $\text{C}_7\text{H}_8\text{CSSK}$  を用いて作製した  $\text{Sb}_2\text{S}_3$  ナノロッドを組み込んだ太陽電池を作製し、光電変換特性を調査した結果、太陽電池の構造が  $\text{FTO}/\text{TiO}_2/\text{Sb}_2\text{S}_3/\text{poly}(3\text{-hexylthiophene})\text{-}2,5\text{-diyl}(\text{P3HT})+\text{Sb}_2\text{S}_3$  ナノロッド/ $\text{MoO}_3/\text{Ag}$  の場合に、 $\text{Sb}_2\text{S}_3$  ナノロッドがないときと比較して  $\text{Sb}_2\text{S}_3$  ナノロッドと導電性ポリマー P3HT との接触面積が増大したことから、作製した層の粗さが改善されたことにより、その発電効率が3.5倍上昇した。

### 有機色素を含む電界紡糸ファイバーの作製と 分光スペクトル特性の評価

Pyrene (PY), 9,10-Diphenylanthracene (DPA), あるいは Coumarin 30 をドナー (D) とし、*N,N*-dihexyl-3,4,9,10-perylenedicarboximide (PDI) をアクセプター (A) としてポリメチルメタクリレート (PMMA) の溶液に添加し、D または A のみを含む単一のファイバーや D と A が共存する D-A シングルファイバー、あるいは二重針を用いて紡糸した D/A コアシェルファイバーを作製し、それらの吸収スペクトルと蛍光スペクトルの測定からフェルスター型エネルギー移動 (Förster resonance energy transfer, FRET) の有無を

判別すると共に、共焦点蛍光顕微鏡観察からファイバー中の色素の分布や会合状態と FRET 発現効率との相関を検討した。PY を D, PDI を A とし、D/A コアシェルファイバーと D-A シングルファイバーを作製したところ、長さ数十 cm、直径  $1\ \mu\text{m}$  前後のファイバーが得られた。ただし、ファイバー中で PY 同士の自己消光が優先的に起こり、PY のエキシマー形成に起因する顕著な FRET は認められなかった。一方、DPA を D, PDI を A とした場合、作製した D/A コアシェルファイバーと D-A シングルファイバーでは、励起波長  $375\ \text{nm}$  で測定した蛍光スペクトルにおいて、 $400\text{--}500\ \text{nm}$  に蛍光が観測され、その相対強度は D-A シングルファイバーよりも D/A コアシェルファイバーの方が高かった。ただし、DPA 由来の発光と PDI 由来の発光の波長領域が一部重複しており、FRET の度合いを区別することは困難であった。一方、Coumarin 30 を D, PDI を A として種々の相対濃度で D/A コアシェルファイバーと D-A シングルファイバーを作製し、励起波長  $405\ \text{nm}$  で蛍光スペクトルを測定し、FRET 効率を算出すると、D/A コアシェルファイバーでは D-A シングルファイバーよりも高い FRET 効率を得られた。共焦点顕微鏡でファイバー中の D と A の分布を観察すると、シングルファイバーよりもコアシェルファイバー中の Coumarin 30 の蛍光強度が小さいことから、コアシェルファイバー中の Coumarin 30 の割合が PDI より相対的に低いために、PDI 自身の濃度消光が抑制され、FRET 効率が高くなったことがわかった。

### 中赤外自由電子レーザーによる格子振動の選択励起

半導体を用いた、個々のフォノンの選択的励起による、特定の格子振動が及ぼす電子状態への影響・相変化や電荷移動の積極的な制御の可能性を模索する研究を継続中である。波長可変な中赤外自由電子レーザー KU-FEL (京都大学エネルギー理工学研究所) によって光学的 (非熱的) に直接的なフォノン励起を行い、さらにアンチストークスラマン散乱測定法を用いてフォノン選択励起を観測する。さらに、高次の過程により、このフォノン分光法の適用範囲を拡げるべく模索している。一例として、ホウ素添加ダイヤモンド (BDD) の超伝導特性を左右する赤外不活性な振動モードが、FEL 光の二光子励起によって選択励起可能であることを示した。

教授 佐川 尚  
准教授 蜂谷 寛

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 材料プロセス科学分野

### 非水溶媒からのアルミニウムめっき

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

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

### 水溶液プロセスによる半導体製膜

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

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

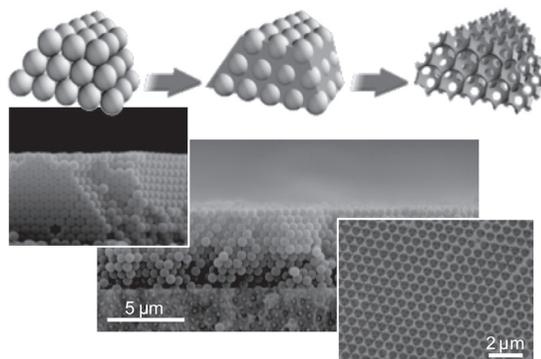
### ミスト CVD 法による薄膜成長

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

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

### 三次元フォトニック結晶の作製

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



教授 平藤 哲司  
准教授 三宅 正男  
助教 池之上卓己

エネルギー材料学講座  
プロセス熱化学分野

**CaO-SiO<sub>2</sub>-Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>系スラグ中の成分活量の測定**

**1. 緒言**

特殊鋼の精錬工程では、合金添加元素の酸化が精錬の効率や製品の品質に影響を与えている。このような現象を検討する際には、Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含有酸化物の成分活量について高い精度の測定値が求められる。本研究では測定対象の酸化物を液体Cu-Cr合金と平衡せる方法に着目し、CaO-SiO<sub>2</sub>-Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>三元系スラグ中の成分活量を測定することを目的とした。

まず、Cu-Cr合金を固体Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>と平衡させ、反応式(1)の標準Gibbsエネルギー変化ΔG°(1)を測定した。

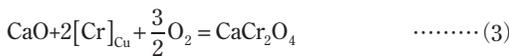


$$\Delta G^\circ(1) = -RT \ln \frac{a_{\text{Cr}_2\text{O}_3}}{h_{\text{Cr}}^2 P_{\text{O}_2}^{3/2}} \quad \dots\dots(2)$$

次に、Cu-Cr合金を固体CaCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub>と固体CaOの二相と平衡させ、ΔG°(1)の測定値を用いてCaCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub>+CaO二相共存領域におけるa<sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub></sub>を測定した。この結果を既報の相平衡関係と比較した。

**2. 実験方法**

CuをCr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>るつぼに入れ、1573Kおよび1623Kに昇温した。H<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>比を変更したAr+H<sub>2</sub>+CO<sub>2</sub>混合ガスを炉内に流入し、炉内の酸素分圧P<sub>O<sub>2</sub></sub>を制御した。一定時間保持して平衡させ、急冷後の合金中Cr濃度[mass%Cr]<sub>Cu</sub>をICP分析により求めた。また、CaCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub>+CaO二相共存酸化物とCu-Cr合金を平衡させる際には、(a)CuをCaCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub>るつぼに入れて式(3)を還元方向に進行させる方法と、(b)Cu-Cr合金をCaOるつぼに入れて式(3)を酸化方向に進行させる方法により平衡を確認した。



**3. 実験結果・考察**

液体Cu中のCr活量がHenry則に従うとき、式(2)は次のように書き換えることができる。

$$\log[\text{mass}\% \text{Cr}]_{\text{Cu}} = -\frac{3}{4} \log P_{\text{O}_2} + \frac{1}{2} \log a_{\text{Cr}_2\text{O}_3} + \frac{\Delta G^\circ(1)}{2RT \cdot \ln 10} \quad \dots\dots(4)$$

式(4)より、[mass%Cr]<sub>Cu</sub>の常用対数はP<sub>O<sub>2</sub></sub>の常用対数に対して傾き-3/4の直線性を示すと見える。図1に1573Kでの結果を示す。Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>るつぼを用いた実験ではa<sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub></sub>=1であるため、切片よりΔG°(1)が求められる。結果を図2に示す。本実験値は既報値<sup>1)</sup>の高温への外挿と良く一致し、次式が得られた。

$$\Delta G^\circ(1) / \text{J} \cdot \text{mol}^{-1} = -1214700 + 331.5(T/K) \quad (1423\text{K}-1623\text{K}) \quad \dots\dots(5)$$

また図1に示すように、CaCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub>+CaOと平衡させた場合でもlog[mass%Cr]<sub>Cu</sub>とlog P<sub>O<sub>2</sub></sub>の間に傾き-3/4の直線性が得られた。帰直線の切片及び式(4)、(5)より、CaCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub>+CaO二相共存領域では1573Kにおいてlog a<sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub></sub>=-1.41と測定できた。

得られた活量値をCaO-SiO<sub>2</sub>-Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>三元系状態図を

用いて検討する。CaCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub>+CaO二相共存におけるa<sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub></sub>はCr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+CaCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub>二相共存におけるa<sub>CaO</sub>に等しい。図3は既報のCaO-SiO<sub>2</sub>-Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>三元系の相平衡関係<sup>2)</sup>であり、CaO-SiO<sub>2</sub>二元系のa<sub>CaO</sub><sup>3,4)</sup>と合わせて示した。本実験結果から算出したa<sub>CaO</sub>を考慮すれば、Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>及びCaCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub>の二つの固相と共存する化合物はCa<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>となるが、これは既報の相平衡関係と一致した。

**参考文献**

- 1) T. K. Inouye, H. Fujiwara and M. Iwase; *Iron and Steelmaker*, 20(1993), No.5, 77.
- 2) F. P. Glasser and E. F. Osborn, *J. Am. Ceram. Soc.*, 41(1958), No.9, 358.
- 3) S. Seetharaman, A. McLean, R. Guthrie, S. Sridhar; *Treatise on Process Metallurgy vol.1*, ELSEVIER, 2014, 539.
- 4) O. Kubaschewski and C. B. Alcock; *Materials Thermochemistry 6th edition*, Pergamon Press, 1993.

准教授 長谷川将克

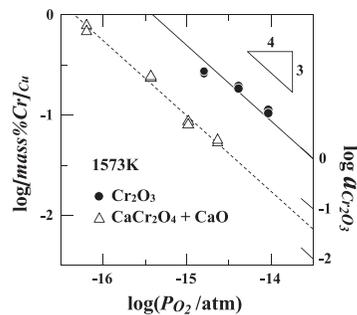


図1 1573Kにおける溶銅中のCr濃度と酸素分圧の関係

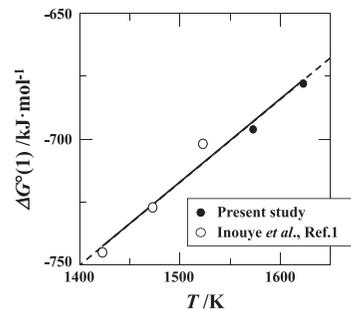


図2 反応式(1)の標準Gibbsエネルギー変化と温度の関係

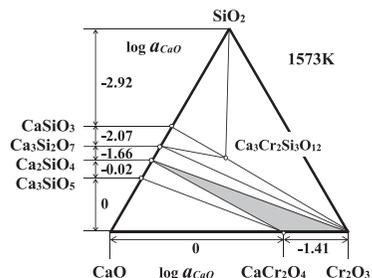


図3 1573KにおけるCaO-SiO<sub>2</sub>-Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>三元系の相平衡関係とCaO活量

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

珪素鋼板をテンプレート基材として用いた  
低コスト高温超伝導線材の開発

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

捗について述べる。

現在、配向性の高い珪素鋼板を用いた基材上の様々な中間層形成に取り組んでいる。図1に高配向性 $\{110\}<001>$ 集合組織珪素鋼板上に作製した $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7/\text{Y}_2\text{O}_3/\text{YSZ}$ 積層膜の $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 層の(103)極点図を示す。中間層が望ましい方位（ $(100)_{\text{YSZ}}// (110)_{\text{Fe}}$ かつ $[110]_{\text{YSZ}}//[001]_{\text{Fe}}$ ）に成長することで得られる超伝導層の2軸配向粒由来の4回対称性のスポットが得られた。この結果より、高配向電磁鋼板上で超伝導YBCO薄膜が望ましい方向に高い配向度で2軸配向していることが確認できた。しかし、組織観察から、珪素鋼板中に含まれるSiが酸化された層が珪素鋼板表面に形成されたことが原因となって、YSZ/珪素鋼板界面で膜が剥離する問題が残っている。現在、酸素ブロック能の高い中間層を開発することでこの問題の解決に取り組んでいるところである。

教授 土井 俊哉  
准教授 堀井 滋

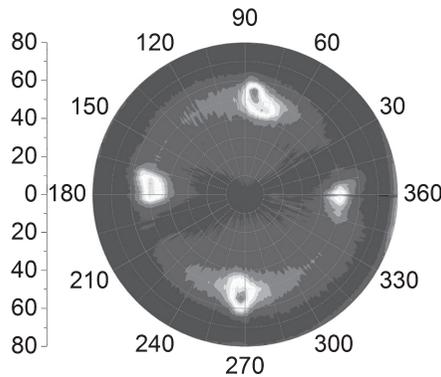


図1 YBCO/ $\text{Y}_2\text{O}_3$ /YSZ/珪素鋼板のYBCO層の(103)極点図。

## 令和元年度水曜会大会

- 日 時 令和元年6月1日(土) 11:00~16:00
- 会 場 京都大学国際イノベーション棟西館5階(シンポジウムホール, ホワイエ)

令和元年度水曜会大会が6月1日(土)に開催されました。京都大学本部構内の国際イノベーション棟にて午前に研究室紹介のポスター展示、正午から懇親会、記念撮影、総会、特別講演会が行われました。正会員および学生、一般参加の方を合わせて、112名の方々にご参加いただきました。

国際イノベーション棟西館5階ホワイエにて各研究室紹介のポスター展示と質疑応答が約1時間行われた後、同場所にて懇親会が開催されました。乾 晴行教授の司会のもとで、平藤哲司会長の挨拶の後、佐々宏一先生に乾杯のご発声をいただきました。歓談の時間が続いた後に、新任・昇任教員からの自己紹介もあり、和気藹々とした雰囲気の中、盛会のうちにお開きとなりました。その後、シンポジウムホール内で記念撮影が行われました。

総会は、シンポジウムホールにて行われました。まず、林 為人教授の司会のもと平藤会長より平成30年度の事業報告がありました。次に、安田秀幸教授による会計報告、小池克明教授からの監査報告がなされ、安田秀幸教授による次年度の予算(案)が提示され、いずれも承認されました。続いて次期役員推挙により、新会長に宅田裕彦教授が選出された後、新会長が挨拶され、抱負などを述べられました。その後、同会場で以下2件の特別講演が行われました。

### 「燃料電池自動車MIRAIの開発並びに水素社会実現に向けたチャレンジ」

トヨタ自動車株式会社Mid-size Vehicle Company MS 製品企画ZF  
チーフエンジニア (FCV「MIRAI」開発責任者) 田中 義和 氏

### 「鉄鋼研究の面白さ：ミクロ組織；マルテンサイト変態；金属疲労」

九州大学大学院工学研究院機械工学部門  
材料強度学研究室主幹教授 津崎 兼彰 氏

来年度は、令和2年6月6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。



## 平成30年度 水曜会会計報告

平成31年 3月31日現在

(単位：円)

収 入		支 出	
前年度繰越金	7,679,986	会誌印刷代（製版・封筒・郵送料込）	
会 費	3,762,000	25巻1号	1,128,799
会誌広告掲載料（製版代込）		水曜会大会経費（30年6月2日）	1,114,963
25巻1号	955,000	編集委員会経費（ホームページ代含む）	57,672
名簿売上	3,500	会誌原稿料	30,000
会誌売上	1,588	通 信 費（切手，後納郵便料）	33,745
水曜会大会懇親会費	247,000	会費等振込手数料	136,482
預 金 利 息	251	事務人件費	955,840
物理工学科同窓会会費	241,880	PC・プリンタ・封筒・文具代等	11,655
京土会・水曜会新入生歓迎会教員参加費	5,000	物理工学科スポーツ大会援助	98,179
旧金属系建物玄関前の桜の再植樹寄付	1,002,000	京土会・水曜会新入生歓迎会経費	30,694
		供 花 代	10,800
		会 費 返 戻	15,000
		小 計	3,623,829
		次年度への繰越金	10,274,376
		内訳 銀行普通預金	7,749,230
		銀行定期預金	2,500,000
		郵便振替預金	11,680
		手 持 現 金	13,466
収 入 合 計	13,898,205	支 出 合 計	13,898,205

上記の通り会計報告いたします。

令和元年年6月1日

会 計 幹 事 安 田 秀 幸

以上の通り相違ございません。

会 計 監 事 ( 監 査 ) 小 池 克 明

## 会 報

京都大学大学院工学研究科教授 石田 毅先生は定年退職されました。



石田 毅先生の御略歴

石田 毅先生は、昭和52年3月に京都大学工学部資源工学科をご卒業になり、京都大学大学院工学研究科修士課程に進学された後、同博士後期課程に進学、昭和55年3月に同課程を1年次で退学され、同年4月、財団法人電力中央研究所に就職されました。平成3年6月に同研究所を退職し、同年7月山口大学工学部社会建設工学科講師に着任され、平成6年4月山口大学地域共同研究開発センター助教授に昇任、平成11年4月山口大学工学部社会建設工学科助教授に配置換の後、平成14年12月同教授に昇任されました。平成18年6月、山口大学から京都大学工学研究科教授に転任され、社会基盤工学専攻資源工学講座地殻開発工学分野を担当され、現在に至っておられます。この間、平成元年3月には「岩盤内の初期地圧状態に関する研究」によって京都大学工学博士の学位を授与されています。また平成5年4月から1年間米国ミネソタ大学に、平成9年12月から三か月間米国オクラホマ大学に客員研究員として留学され、研鑽を積みられました。

この間永年にわたって、学生の教育と研究者の指導

にあたり、多くの人材を育成し、京都大学においては平成20年度及び平成23年度に社会基盤工学専攻長を、平成27年度に工学部地球工学科長を務められました。また、京都大学工学部資源系・金属系同窓会である水曜会の副会長及び会長を歴任され、京都大学生協同組合においては理事を、体育会においては平成22年より9年間にわたりバスケットボール部部长として課外活動の指導・監督を務められました。学会においては、資源・素材学会理事（関西支部長）、岩の力学連合会常任理事、同連合会国際技術委員会委員長、同連合会電子ジャーナル委員会委員長、同連合会「50周年記念事業委員会」委員長、日本材料学会岩石力学部門委員会委員長、土木学会エネルギー委員会二酸化炭素回収・貯留（CCS）における調査・研究小委員会委員長などを歴任して学会の活動に貢献されました。海外においても、国際会議での招待講演、米国をはじめスウェーデン、ノルウェー、フィンランド、ドイツ、ポーランド、チェコ、イギリス、オーストラリアなどの大学や研究機関からの招聘に応じて、多数の講演を行ってき

ておられます。また、Springer 出版の国際学術雑誌 Acta Geophysica や Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources の Editorial Board Member として、あるいは、Taylor & Francis Group, CRC Press/Balkema 出版、Geomechanics Research Series の Series Editor として国際的な学術研究成果の出版に貢献しておられます。

石田 毅先生はこれまで一貫して岩盤力学に関する研究に携わり多くの業績を挙げておられます。そのひとつは、岩盤内の地圧状態が地殻変動に基づく地殻の圧力と密接に関連していることを明らかにされた研究で、その成果は地下発電所など大規模な地下空洞の設計や、地震予知の基礎資料として現在でも有効に活用されています。また、AE（アコースティック・エミッション）と呼ばれる岩盤の破壊に伴う微小な音の測定に注目され、室内実験や小規模な現場実験などを行って建設現場に適用できる観測手法を開発し、電力会社の三箇所の地下発電所に提案して空洞掘削時の観測を行い、この手法が地下空洞の安定性監視に有用であることを実証されました。この成果に基づきこの手法の有用性が認識され、その後建設された大規模な空洞の建設では、観測の規模を拡大して実施されています。またこの一連の研究成果を「岩盤破壊音の科学」という著書として上梓されるとともに、国際岩の力学会 (ISRM) にワーキンググループを結成し、その主査として国際的な AE 測定指針を取りまとめておられます。京都大学着任後は、シェール・ガス、オイルの採掘に必要な水圧で岩盤を破碎する技術の研究にこの AE 測定手法を応用されています。特に、この岩盤の破碎に水の代わりに二酸化炭素を用いると、シェール・ガス、オイルの生産に有利な分岐の多い三次元的な亀裂が広い範囲に造成されることを、室内と小規模な現場実験の AE 測定で明らかにされました。これは、エネルギー資源回収と地球温化防止を同時に実現する海外でも例がない先進的な大きな研究成果であり、国際学術雑誌に頻繁に引用されています。

以上のように石田 毅先生は、39年にわたり、学術研究と教育に多くの業績を上げられ、エネルギー資源の利用に関わる岩盤力学の分野において学術研究の発展及び国際交流に多大な貢献をされました。

これまでの先生の長年にわたるご業績をたたえとともに、ご指導に厚く感謝申し上げます。また、先生が今後ご健勝で、多方面にわたり益々活躍されますことを、心よりお祈り申し上げます。

奈良禎太  
(地殻開発工学分野 准教授)

## 石田先生のご退職に寄せて

清水 浩之

私が初めて石田先生にお会いしたのは、2005年、私が4回生の時でした。当時教授であった斎藤敏明先生が退官され、後任として石田先生が着任されましたが、その夏には研究室が吉田キャンパスから桂キャンパスへと引越することにもなっており、大変にあわただしい時期であったことを記憶しております。

私もちょうど修士課程に進学するところでしたので、このような環境の変化の中やっていると不安に思うところもありましたが、全くの杞憂でした。修士研究のテーマとしてご提示いただいた水圧破碎や AE (Acoustic Emission) に関する数値解析は大変魅力的な研究テーマであり、このテーマでどこまで進めるのか是非やってみたいとの思いから博士課程進学もすんなり決断することができました。特に水圧破碎に関する研究は石田研を卒業後も私のメインとなる研究テーマとなっており、研究者としての道に進むきっかけや導きを与えてくださった石田先生に対し、深い感謝の意を表します。

修士課程、博士課程と石田研に在籍し、2010年までの6年間を一貫して石田先生のもとで研究することができました。研究室在籍時には、ゼミや講義等でご指導いただく機会は多くあり、その中で石田先生はいつもにこやかで、とても楽しそうに話をするという印象があります。研究室のゼミでは、鋭い指摘をいただくこともありましたが、良い成果が出てくると、「それは面白い」とストレートに言っていただけ、それが大変嬉しく、研究を続けるモチベーションになっていました。講義やプレゼンテーションの時にはジョークを交えてユーモアを忘れないなど、真剣に研究に打ち込むのはもちろんのこと、やはり楽しくなければ続かないということに気づかせてもらえました。

また、石田先生は世界との交流についても積極的に取り組まれていました。世界中の研究者とのネットワークがあり、その広い交友関係から海外の研究者を研究室に招き、英語でのディスカッションを行う機会を与えていただけました。思えば、私が英語を実践的に使ったのはこの時が初めてだったと思います。研究発表にも慣れていない学生の初めての英語発表だったので、頭が真っ白になったことを覚えています。当時は大変だと思っていましたが、今となっては大切な経験の一つになっています。

研究に対しては成果をいち早く世界に向けて発信することを重視していると感じていました。今現在、社会人として仕事をしていると、成果物の完成度を高め

ることだけでなく、それをアピールすることの大切さを実感していますが、当時の私は、自身の研究を完全になるまで仕上げから発表したいという思いから、研究の途中経過を発表することに反発することもあり、博士課程になってから最初の投稿論文を仕上げるのにずいぶん時間をかけてしまったことを覚えています。その節は大変ご心配をおかけしました。このとき時間をかけてご指導いただいた論文の書き方や発表の仕方、そして研究者としての在り方は現在も私を支えてくれる基礎となっています。

最後になりましたが、6年間、時に厳しく、時に優しく石田先生にご指導いただき、ありがとうございます。石田研という環境で過ごした時間はとても貴重なもので、これはこれまで先生が送り出されてきた多くの学生たちと同じ気持ちであると感じています。学生時代を石田先生にご指導いただけたことに感謝するとともに、石田先生のご健勝とますますのご活躍をお祈りして、お祝いの言葉とさせていただきます。

(鹿島建設株式会社 平成17年卒/平成22年博)

### 石田 毅先生のご退職に寄せて

赤井 崇 嗣

初めて石田先生にお会いしたのは、私が修士1回生の頃に、先生が社会基盤工学専攻の教授として着任された際でした。当時の石田研では、大きく分けて、岩盤工学、油層工学、等に関する分野が研究されていました。定期的に開催される研究室ゼミでは、研究分野の違いを超えて互いに活発に意見を交わしていました。石田先生が招致された海外の研究者を交えてゼミを行う事もありました。当時、自身の英語能力が全く不足、非常に苦戦をしたのを今でも覚えています。当時の石田先生のご指導を振り返ると、特に、「論理の正確性とわかりやすさ」および「他の研究者との人的ネットワークの重要性」を教えて頂いたと思っています。

その後、石油天然ガス関係の機関に就職した私は、卒業後も先生のお力をお借りする機会が多々ありました。先生が、専門的にご研究されていた Acoustic Emission (AE) は、2010年代から盛んになったシェールガス開発において、欠かせない重要技術の一つであり、今もお開発現場で盛んに活用・研究されています。これについて、幾度となく、先生にご相談させて頂きました。研究について議論するにあって、先生は、いつも、新しい事にチャレンジする柔軟性とその実現性の双方をバランス良く考えていらっしゃいました。加えて、わかりやすく説明してくださるので、他の研

究者も理解し、さらなるアイデアを出すことができるため、先生を中心とした人的ネットワークがみるみる内に構築され、膨らんでいきました。その結果、複数の石油開発会社の専門家が一同に会して先生を訪ね、水圧破碎技術に関するワークショップを開催する事もありました。そのような機会を通じて、先生のご研究の成果と知見が、石油業界へ浸透していく様子を間近で見させていただきました。

直近では、昨年、先生が、ドイツの研究機関へ出張されるのに同行させて頂きました。先生が訪問先の研究機関から歓待を受ける様子や、若手研究者らが食い入るように先生の講演に聞き入っている様子を見て、改めて、先生の研究者として偉大さとご人望の厚さを再確認する機会でした。

先生が社会基盤工学専攻に着任されてから、およそ10年が経過し、その間、次々と教え子達が卒業していきました。そのうちの1人でもある私は、今でも、当時の研究室のメンバーや、その後、研究室を卒業した後輩らと一緒に、現在の職場での業務に取り組むことが多々あります。先生にご指導された教え子達が、卒業後も協力しあい社会の課題に取り組んでいる事は、先生の教育者としてのご業績を物語っています。

ご退職後も、異なるお立場にて、引き続きご活躍される事と思いますが、ご自身のご健康に充分ご留意され、末永くご活躍される事を心より願っております。引き続き、これまでと変わることなく、ご指導くださいますようどうぞよろしくお願いいたします。

(現インベリアルカレッジロンドン/石油天然ガス・金属鉱物資源機構 平成18年卒/平成20年修)

### 石田 毅先生のご退職に寄せて

丹羽 智 哉

この度は定年での退職、誠にありがとうございます。

研究室に配属された2008年4月から、修士課程を終える2011年3月までの3年間、私は石田先生から公私ともに多大なるご指導を賜り、また大変お世話になりました。既に岩盤工学及び資源工学の分野から遠のいて久しく、専門的な用語もかなり曖昧になっておりますので、研究内容等の難しいお話は諸賢に委ね、先生のお人柄に触れさせていただきたいと思います。

まずは、日々の研究室生活での一コマです。私は当時、朝が弱く、研究室に行くのはお昼過ぎという所謂「不真面目な」学生でした。しかしながら、石田先生はそんな私を厳しく叱りつけることなく、笑みを携えながら「丹羽君、午前中顔見ないねえ」とやんわりと

ご指導くださったものでした。思い返してみると、他の場面でも石田先生が声を荒げるところは一度も見たことがありません。いかなる時でも穏やかな口調と広い懐で、私たち学生を受け入れてくださりました。結果的には、その懐の広さに甘え、最後まで私が午前中に研究室にいることは稀でありましたが、それでも「丹羽が腐らぬように」と、怒りをグッと堪えて、我慢して接していただいたのではないかと推察しつつ、反省をしております。

また研究室の外に出ると、様々な企業・団体との共同研究で、年に数回、石田先生同行のもと1週間ほどかけて出張し、粘り強くAE (Acoustic Emission) のモニタリング実験を行いました。実験というのは当然全てが思い通りに行くのではなく、時には出張期間があと1日しか残っていないのに、結果が出ないといったこともあったと記憶しています。そういった時でも石田先生はやはり、決して焦ることなく、次の一手を考え、我々にご指示いただいたものでした。今思えば、電中研時代をはじめ、数々のフィールドで実験を重ねてきた石田先生にとっては、そういったトラブル(?)は日常茶飯事だったのかもしれません。ただ学生にとっては、こういった石田先生の安定感に幾度となく救われ、楽しく前向きに研究に打ち込むことができたのだと実感しております。

そして、こうした石田先生のご姿勢やお人柄は、学生だけでなく、共同研究先の方々をはじめとする、関係者の方々にも伝わり、それ故に「石田先生が言うなら協力しましょう」と言わせるくらい厚く強固な信頼関係を構築されておられたのだと拝察いたします。

インドで開催された国際学会にも同行させていただきましたが、石田先生を中心に様々な企業の方が周りを固め、まるで視察団かのような形であったのは、石田先生が如何に周りの方から慕われているかという証左であったと思います。しかしながら石田先生は、偉ぶることもなく常に周りに気を遣われ、セッションの合間には奥様共々、我々を観光に連れて行って頂いたのは、本当に貴重な思い出として記憶に残っています。

「お気遣い」ということで申し上げます、これは私が卒業して1年半ほど経った頃のことですが、既に研究を離れて久しい私宛に、石田先生から一通メールを頂きました。それは、在学時に私が携わっていた研究内容が海外の雑誌に取り上げられたということでした。私本人は大変嬉しかったのを覚えておりますし、何より、私にまでお気遣い頂いたことに驚き、頭が下がる思いでした。

以上のように、学生時代に、そして卒業してからも触れて学んだ石田先生のご姿勢やお人柄は、研究から

離れた今でも、私にとって大事なお手本とさせていただいています。

分野は異なれど、今後とも引き続きご指導ご鞭撻賜りたく、また、石田先生のご健勝と、今後の益々のご活躍を祈念してお祝いの言葉とさせていただきます。拙文失礼いたしました。

(中部電力株式会社 平成21年卒/平成23年修)

## 石田 毅先生のご退職に寄せて

青 柳 和 平

石田先生には、平成21年の研究室配属のときからお世話になっています。研究室に在籍していた頃は、石油開発における坑井掘削時の孔壁の安定性を評価するための室内試験のプロジェクトに3年間従事しました。先生が長年従事されてきた岩盤の破壊音(AE)の測定により孔壁の破壊の進展をモニタリングすることが目的でしたが、実験で取得できた信号はノイズばかりでそもそも測定が成り立たなかったことなどもあって、初年度は実験がなかなか進まずに先輩たちとともに焦り悩む日々が続いたこともありましたが、そのような状況の中、先生も直接実験現場を確認し、成功のための改善案を学生たちとともに何度も議論しました。試行錯誤を重ね、ようやく3年目で当初計画を満足するデータを得ることができました。石田先生の下でプロジェクトの最初から最後まで携わることで、研究成果を創出するには多くの労力と時間を要することを学ぶことができたのは、今となっては貴重な経験であったと思います。

研究室では、研究関連知識のみならず、論文の書き方、日本語の文章の作成技術、プレゼン技術といった基礎的なことについて、初歩の初歩から優しく、時には厳しくご指導いただきました。数多くのご指導いただいた中で、特に感銘を受けたこととしては、卒論発表の研究室ゼミでコメントされた、「工学の学士を取得するのだから、社会にとってどのように役に立つのか説明できるようになさい」というお言葉を深く記憶しています。学生時代にはそれに対する答えがなかなか見つかりませんでしたが、研究を進めるうえで大変重要なことであるということ、当時も今も感じています。平成24年に修士課程を卒業した後、国立研究開発法人日本原子力研究開発機構の幌延深地層研究センターにおいて研究員として採用され、引き続き岩盤力学の研究開発に従事することとなりましたが、研究テーマ策定時や成果取りまとめの際は、「研究成果が社会でどのように役に立つのか」ということを考えるように心がける意識を持つことができるよう

になったと思います。

修士過程卒業後も、博士号取得について気にかけてくださり、入社3年目の平成27年度から博士課程学生として研究室に受け入れていただきました。博士課程在籍中は、学生時代の研究成果と社会人になってからの現場をメインとした研究成果の連携についてなかなか考えがまとまらずに苦労しましたが、出来の悪い私に対してお忙しい中時間を割いてご指導いただきました。その甲斐もあり、無事に3年間で博士号を取得することができました。学生時代、社会人時代を通して研究を進めるにあたり先生と多々議論したことは、大変良い思い出となっています。研究室配属からこれまでの約10年間にわたって優しく、時には厳しく指導していただいた先生には心から感謝しています。先生は今後も研究に携わっていかれるとのことで、今後ますますのご健勝、ご活躍をお祈り申し上げます。

(国立研究開発法人日本原子力研究開発機構  
平成22年卒／平成29年博)

### 石田 毅先生のご退職に寄せて

藤 戸 航

石田先生、ご退職誠にありがとうございます。

私が初めて先生に会ったのは、学部三回生の「先端資源エネルギー工学」の講義でした。当時の資源系研究室では探査データの解析や油層シミュレーションによる研究が主流であった中、「坑道での原位置水圧破壊実験」という先生の大がかりな研究に出会ったときの衝撃は、子供のように楽しそうに話す先生の顔と併せて今でも鮮明に思い出されます。

その後、言うまでもなく先生の研究室を選択した私は、修士課程修了までの3年間で、実に多くのことを学ばせていただきました。中でも、研究を通じて得られた「立場に臆せず主体的に取り組む姿勢」は、終生私の中で生き続けることと思います。期間、回数、予算が限られた実験の中で当時学部四回生だった私の意見を柔軟に取り入れてくださったことや（これは私が無知であるがゆえにできたことでもあります。後日一回当たりの実験の金額を聞いて、腰がぬけそうになりました。）、生意気にも先生に歯向かう私に対して真っ向から議論をしてくださったことが、いかに貴重な経験であったかを、卒業した今になってようやく実感しております。私が勝手気ままに研究を進めることができたのは、ひとえに先生の深い懐によるものです。感謝してもしきれません。

短い期間ではあるものの、先生の傍らで実験、研究の時間を共にしてきた中で、特に印象的だったことが

2つあります。1つ目は、先生の粘り強さです。失敗した実験の中からも、常に何か言えることはないかと執着するお姿からは、「AE(岩盤破壊音)」という特定のテーマに30年以上拘り続けた研究者の矜持を垣間見ることができました。2つ目は、先生の人柄の良さです。先生は日ごろから、仕事における人の縁の大切さを語っておりました。先生のご縁は、その優しく朗らかな人柄の下に集まったのではと、僭越ながら思う次第です。

最後になりますが、これまでの先生のご指導、ご鞭撻に厚く感謝申し上げるとともに、今後のご健勝、ご活躍をささやかながらお祈りいたします。

(株式会社日水コン 平成28年卒／平成30年修)

### 石田先生のご退職に寄せて

直 井 誠

石田先生には、当時東京大学地震研究所のポスドクだった私に、共にアコースティック・エミッションという非常に小さな破壊を研究しているというご縁からお声がけいただき、2014年から約5年にわたって、京都大学資源工学コース地殻開発工学分野にて、一緒に研究をさせていただく機会を頂きました。故あって、先生のご退職数ヶ月前に研究室を離れることになってしまいましたが、桂ではとても楽しく研究生生活を送ることができました。私生活でも仕事上でも生活が激変した5年間であり、それまでずっと理学畑で過ごしていた私にとって戸惑うことも多くありましたが、その都度丁寧にご指導いただき、導いていただいたことに感謝しています。また、大阪府北部地震の際には、職場近くのご自宅で子どもをお預かりいただくなど、奥様とともにサポートしてくださったことを、大変ありがたく思っております。

研究面では私の気持ちを尊重してとても自由にやらせていただき、また、一緒に研究をさせていただくことで、資源分野での新しい研究テーマに取組む機会も頂きました。それまで比較的學生が少なく、むしろ教員のほうが多いという環境にいた私にとって、毎年コンスタントに学生さんが配属され、かつほとんどが修士まで進学するという環境は未知のものであり、どのように学生指導をしていけばよいのか当初は不安も大きかったのですが、頻繁に相談にのっていただき、実際に石田先生がご指導されているのを見て、手探りで自分なりに職責を果たせるように努めてきました。研究室での仕事のあらゆる面で私の考えを尊重していただき、非常に暖かく見守ってくださったなあ、といまさらながら感謝しております。

石田先生は岩盤力学を主戦場としており、一度掘削した孔の破壊状況から応力の情報を得るといった研究などでも多くの業績を残されていますが、先に述べたように、私は岩盤中で生じるアコースティック・エミッションに関する研究で一緒に仕事をする機会に恵まれました。その中でも私が京大に着任した頃には、資源の開発現場などで使われている水圧破碎技術の発展のため、水圧破碎を起こした際に生じるアコースティック・エミッションの特徴から造成亀裂の情報を得る、という研究テーマで研究をされておられました。特に、二酸化炭素を用いた破碎によってその貯留と資源回収

を同時に行うことで、温暖化抑止のために必要な技術のコスト的な難点を資源回収でカバーするというアイデアは、将来の社会実装まで見通して立案したユニークなものでした。在職中はこのような問題に、室内・現場での実験を手がかりにして取組むという研究をされていましたが、今後もこれらを軸として研究活動を続けられるとのことで、益々のご健勝、ご活躍をお祈り申し上げますと共に、引き続き変わらぬご指導のほど、どうぞよろしく申し上げます。

(京都大学防災研究所 地震予知研究センター  
元・地殻開発工学分野 教員)

## 2019年度 京土会・水曜会新入生歓迎行事 報告

2019年7月31日(水)に、地球工学科1回生向けの行事である桂キャンパス訪問に合わせて、2019年度京土会・水曜会新入生歓迎行事が桂キャンパスにて開催された。本稿ではその概要を報告する。

まず16:30より、桂キャンパスCクラスター191号室において歓迎会が開催された。最初に2019年度水曜会会長の宅田裕彦教授(エネルギー応用科学専攻, 資源工学コース)が歓迎会開会の挨拶をされ(図1)、水曜会の名称の由来や同窓会の有用性を説明されるとともに1回生に対する励ましの言葉をかけられた。続いて若手教員からのメッセージとして、野口恭平助教(社会基盤工学専攻, 土木工学コース)、石塚師也助教(都市社会工学専攻, 資源工学コース)、藤森崇助教(都市環境工学専攻, 環境工学コース)の3名から、ご自身の学生時代や現在の研究の紹介、また有意義な学生生活を送るための熱いメッセージが送られた(図2)。

その後、船井哲良記念講堂国際連携ホールに場所を移して、17:20から1回生、大学院生、および教員による懇親会が実施された。まず2019年度京土会会長の米田稔教授(都市環境工学専攻, 環境工学コース)より懇親会開会の挨拶とソフトドリンクによる乾杯のご発声があった(図3)。軽食をつまみながらの普段とは

全く異なる雰囲気の中、学生と教員の垣根を越えて終始和やかに交流が深められた(図4)。最後に京土会副会長の三村衛教授(都市社会工学専攻, 土木工学コース)から中締め挨拶があり(図5)、18:00頃に盛会のうちに歓迎行事を終えた。

今年度は110名強の一回生と19名の教員の参加があり、大変盛況であった。参加した1回生からも好評を得ることができ、同窓会への帰属意識を向上させる有意義な行事であった。末筆ながら、歓迎行事後の学生の移動には桂キャンパス訪問としてチャーターした大型バスを利用させていただいた。ご協力くださった工学部地球工学科にはこの場を借りて御礼を申し上げます。

水曜会担当幹事 浜 孝之(エネルギー応用科学専攻 准教授)



図3 懇親会開会の挨拶をされる京土会米田会長



図1 歓迎会開会の挨拶をされる水曜会宅田会長



図4 懇親会の様子



図2 石塚助教による若手教員からのメッセージ



図5 閉会の挨拶をされる京土会三村副会長



令和元年度 水曜会後援ソフトボール大会

- 期間 令和元年 5月
- 会場 京都御苑今出川広場

新時代「令和」最初のソフトボール大会も例年同様水曜会の後援をいただき、盛大に開催されました。総勢13チームによって予選リーグを行い、4リーグそれぞれの1位チームによる決勝トーナメントで雌雄を決しました。

Aリーグ

	杉村研	安田研	乾研
杉村研		杉村 17-1 安田	杉村 7-8 乾
安田研	安田 1-17 杉村		安田 10-15 乾
乾研	乾 8-7 杉村	乾 15-10 安田	

Bリーグ

	ナノ構造学研究室	宇田研	平藤研
ナノ構造学研究室		ナノ 3-3 宇田	ナノ 5-3 平藤
宇田研	宇田 3-3 ナノ		宇田 2-18 平藤
平藤研	平藤 3-5 ナノ	平藤 18-2 宇田	

Cリーグ

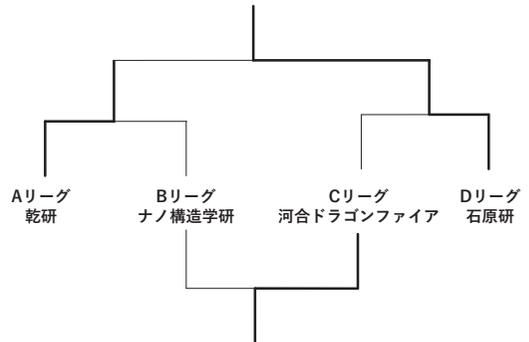
	河合ドラゴンファイア	辻研	石山・川那辺研
河合ドラゴンファイア		河合 10-3 辻	河合 14-8 石山
辻研	辻 3-10 河合		辻 0-10 石山
石山・川那辺研	石山 8-14 河合	石山 10-0 辻	

Dリーグ

	長谷川研・土井研	邑瀬研	石原研	今谷研
長谷川研・土井研		長谷川 8-7 邑瀬	長谷川 3-14 石原	長谷川 5-12 今谷
邑瀬研	邑瀬 7-8 長谷川		邑瀬 6-15 石原	邑瀬 10-0 今谷
石原研	石原 14-3 長谷川	石原 15-6 邑瀬		石原 13-12 今谷
今谷研	今谷 12-5 長谷川	今谷 0-10 邑瀬	今谷 12-13 石原	



石原研



## 会 員 消 息

### 1960年鉦山科卒の同期会 報告

1960年鉦山科卒の複素空間同期会を去る5月17日に新横浜駅側で開催。出席は実空間の伊藤・梅原・上村・小泉・成瀬・萩原・藤本・松下・米田・柳沢の10人、虚空間の中林・福中・小山・池見・北神・岡田・西田の7人、欠席は療養と介護の久賀・楯原・灘谷・中村・中納の5人。今年は「静脈」瘤破裂からの回生、腰・脚痛等の病歴に、筋トレ・黒ニンニクの利用・減塩玄米菜食40年に肉を加え7年経過等等・・・の摂生法、脚を損じてから全国を回遊している話。メールは不信で

不使用だがネットでオルガンを購入・修理した話。長生きに命をかけている話。かくの如く矛盾を気にしないで過ごしているのが判明。当会は1999年2月に、通称ベビーギャングの福中が「他の年代は、全て欠けているが同期会を開いている。俺達は全員健在だが、開いていない、墮ってる！全員集合」と号令。流石、唯一の現役入学、柔か頭と情報網に一同感服。京都市で、全員実空間、出席22人・欠席1人。所が間もなく福中が神仏変換を受けてしまった。以来幾星霜、参加者も前記の状態なるも彼の遺志を曲がりなりに継ぎ、本年度20年の14回目。近年は毎年開催。

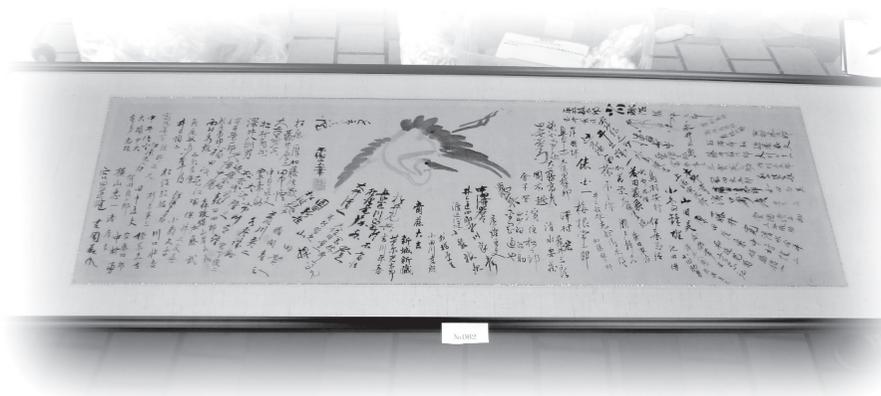
(柳沢恒雄 鉦山・昭35)

### 斎藤大吉先生還暦祝賀会席上寄書の寄贈について

かつて旧工学部6号館の水曜会資料展示室に展示されておりました斎藤大吉先生還暦祝賀会席上寄書(写真)は、旧工学部6号館の耐震工事および採鉱冶金学教室創立六拾周年記念館の取り壊しにより展示場所を失いました。その後、旧工学部6号館の倉庫で一時的

に保管しつつ、恒久的な保管場所を探しておりました。この度、京都大学大学文書館に寄贈することといたしました。文書館からは、大切に管理のうえ貴重な資料として有意義に活用するとの言葉を頂いています。文書館の保管物の一部は時計台の展示室に展示されておりますので、本寄書も多くの皆様のお目にかかる機会があるかもしれません。

(平成30年度水曜会長 平藤哲司)



水曜会創立120周年記念事業  
旧金属系建物玄関前桜再植樹 中間報告

すでに水曜会大会やホームページを通じてご報告しておりますように、皆様からお寄せ頂いたご厚意により、平成31年3月23日に桜（ソメイヨシノ）の植樹を行い、ご寄付を賜りました皆様には記念として50年の寿命を全ういたしました桜を加工して作成したコースターをお送りいたしました。これを持って寄附の受け付けは終了させて頂き、感謝の意を表すため、ご寄付頂いた皆様のご芳名をここに掲載させて頂きます。

また、令和元年10月3日現在の会計報告も合わせて掲載させて頂きます。残金につきましては、寄附者名を記載した銘板の作製を計画しておりましたところ、撤去されずに残っていたかつての老木の根から、新しい芽吹きがみつかるという想定外の喜ばしい事態が生じました(写真)。現在、苗木の育生と移植の検討を行っております。支出のその他には、桜の生育保護のための立札、支柱などの代金が含まれます。残金の使途につきましては、再検討の後、ご報告させて頂きますことをご容赦くださいますようお願い申し上げます。

令和元年10月

桜植樹世話人(平成30年度会長) 平藤哲司

水曜会創立120周年記念事業

旧金属系建物玄関前桜再植樹 寄附金寄贈者ご芳名

<特別名誉会員>

村上陽太郎(昭和17・冶金)(令和元年8月29日ご逝去)

中廣 吉孝(昭和32・鉱山)

<元教官・教員(教室出身者以外)>

段野 勝, 田村剛三郎, 酒井 明, 山末 英嗣,

大西東洋司

<現 教 員(教室出身者以外)>

河合 潤, 三ヶ田 均, 邑瀬 邦明, 林 為人

<教室出身者>

昭和21・鉱山 末吉 敏彦

昭和23・鉱山 山本 和男

昭和26・鉱山 小川 昌平

昭和26・冶金 荒川 次郎

昭和27・冶金 赤松 経一, 上田喜三郎

昭和28・鉱山 矢野 晴也

昭和28・冶金 木村 貞治, 西村 義雄

昭和29・冶金 竹本 博

昭和30・鉱山 長谷 紀雄, 三輪 義人

昭和30・冶金 太田 奨

昭和31・鉱山 米津栄次郎

昭和31・冶金 弘田 昇  
昭和32・鉱山 丸橋 通伸  
昭和33・鉱山 中尾 強  
昭和34・冶金 伊藤 久雄, 濱田 元春, 南浦 基二  
昭和35・鉱山 伊藤 重信, 上村 哲夫, 久賀 俊正,  
榎原 琇聰, 柳沢 恒雄  
昭和35・冶金 山田 武弘  
昭和36・鉱山 佐藤 健, 高島 哲雄  
昭和36・冶金 恩田 怜, 小松 伸也, 関口 力,  
原田 浩, 原田 道雄  
昭和37・鉱山 井手 謙三, 白井 勲  
昭和37・冶金 松室 知視, 柳島 章也  
昭和38・鉱山 花崎 紘一  
昭和38・冶金 岩尾 修, 大谷 泰夫, 野田 郁郎  
昭和39・鉱山 伊藤 公正, 大本 隆司, 加藤 肇彦  
昭和39・冶金 田中 征男, 野口 治男, 天野 宗幸  
昭和40・資源 赤堀 明夫, 齋藤 敏明  
昭和40・冶金 大石 敏雄, 久我 正昭, 山本 悟,  
横井 健至  
昭和40・金属 酒井 一夫, 三宅 芳男, 山口 勝  
昭和41・資源 菅野 強, 原 勝夫, 真家 倫,  
横山 茂  
昭和41・冶金 大西 建男, 岡島 弘明, 櫻井 市蔵,  
東 勝, 綿谷 英男  
昭和41・金属 難波 宏邦, 蜂屋 正信  
昭和42・資源 中込 幹生  
昭和42・冶金 奥野 真弘  
昭和42・金属 水谷 吉宏, 臺 勝憲  
昭和43・冶金 粟倉 泰弘, 黒木 正純, 谷口 行,  
松井 正昭  
昭和43・金属 清水 勝, 高山 新司, 永野 正道  
昭和44・資源 青木 謙治, 浅井 達雄, 武田 英,  
橋爪 清, 村井 正澄, 吉田 庄太  
昭和44・冶金 池田 清, 池田 辰雄, 金澤 守,  
島内 義風, 田部井和彦, 土田 豊,  
森永 正彦, 盛山 博一, 横川 清志,  
吉本 宏, 和気 久夫, 服部 成雄  
昭和44・金属 明智 清明, 池内 建二, 岡田 康孝,  
梶谷 幹男, 野村 俊雄, 長谷川輝之,  
波戸 浩, 前田 安, 山口 照夫,  
吉岡 純夫, 八十 致雄  
昭和45・金属 三好 明男  
昭和46・資源 植出 和雄, 村上 建夫, 中村 元  
昭和46・金属 井口 新一, 大谷 泰清  
昭和47・冶金 内貴 治三  
昭和48・冶金 藤原 茂, 杉村 公正  
昭和48・金属 津村 輝隆, 鳥居 久道, 日名 英司  
昭和49・資源 藤原 猛, 安井 正和  
昭和49・金属 阿部 正映, 白井 泰治

昭和50・金属 今西 良文, 江阪 久雄, 東田 賢二  
 昭和51・資源 広瀬 和博  
 昭和51・金属 楠井 潤, 倉持 信一  
 昭和52・資源 江原 昭次  
 昭和52・金属 上島 良之, 佐藤慎一郎, 明珍 宗孝  
 昭和53・資源 木村 伸, 本郷 克己, 三宅 祥寿  
 昭和53・金属 酒井 秀彦, 中堂 益男, 松本 賢治,  
 元山 義郎  
 昭和54・資源 田中 正人  
 昭和54・金属 玉井富士夫, 富永 充久  
 昭和55・資源 北村 公亮, 永瀬 秀一  
 昭和55・金属 青山 明, 柏木 健, 澤田 兼司,  
 竹川 禎信  
 昭和56・資源 田中 真人  
 昭和56・金属 浅田 泰弘, 渥美 哲郎, 石原 慶一,  
 上島 豊子, 土佐 正弘, 平藤 哲司,  
 札軒富美夫, 松田 陽一  
 昭和57・金属 汲川 雅一  
 昭和58・資源 熊澤 輝久, 平工 恵三  
 昭和58・金属 築地 達郎, 湊 万寿男, 宮崎 昭二  
 昭和59・金属 上嶋 啓史, 須藤 豊, 高原 一紀  
 昭和60・資源 小菅 規央  
 昭和60・金属 関口 浩, 中村 裕之, 福元 成雄  
 昭和61・資源 小池 克明  
 昭和61・金属 入谷 英樹, 杉村 真人, 田中 宏樹  
 昭和62・資源 川口 卓也  
 昭和62・金属 奥村 英之, 竹川 宜志  
 昭和63・金属 青木 宏憲, 藤井 英政, 山内 啓史  
 平成元・資源 白旗 秀紀, 吉房 宏之  
 平成元・金属 梶山 浩志, 高橋 尚也, 辻 伸泰,  
 吉村 眞一  
 平成3・資源 谷本 義典  
 平成3・金属 伊藤 和博, 戸田 欣樹  
 平成4・金属 遠藤 義則, 兵江 猛宏, 安那 啓  
 平成6・金属 浅田 知恒, 宇田 哲也, 矢野 尊之  
 平成7・資源 金城 正志, 佐藤 知史  
 平成7・金属 伊田 英紀, 岡本 明, 高浜 義久,  
 松田 和博  
 平成8・資源 大久保元裕  
 平成8・金属 山本篤史郎  
 平成10・材料 三宅 正男, 吉川 潤  
 平成10・エネ 長谷川将克, 安井 雅人  
 平成12・エネ 蛭川 典泰  
 平成13・エネ 白鹿 剛  
 平成15・材料 藤堂 尚二, 堀内 尚紘  
 平成16・材料 溝谷健太郎, 田中 友規

平成17・資源 栗栖 憲  
 平成17・エネ 笠原 秀平  
 平成19・資源 大野 恵, 國枝 真  
 平成19・材料 中江 保一, 矢澤 好弘  
 平成20・資源 樺島 智大, 田中 暁  
 平成21・資源 鈴木 悠平  
 平成22・資源 岡野 法之  
 平成22・材料 岩崎 寛之  
 平成22・エネ 位 一平  
 平成25・資源 北谷 卓也  
 平成25・エネ 秋津 裕  
 平成29・材料 大谷 紀子  
 平成31・エネ 光山 童夢

以上 241名

### 水曜会創立120周年記念事業 旧金属系建物玄関前桜再植樹 会計報告

令和元年10月3日

収入の部	
桜再植樹寄附金	1,066,000円
収入合計	1,066,000円
支出の部	
ソメイヨシノ植栽工事	43,200円
記念品作製	437,400円
記念品発送	93,463円
振込手数料	1,080円
その他(立札, 支柱など)	12,776円
支出合計	587,919円
残 金	478,081円

以上



## 会 員 通 信 欄

平成31年度水曜会大会への返信はがきには、会員の方々から多くのお言葉や近況報告を頂きました。ここにその一部を掲載致します。なお、文章を損なわない程度に表現を変えた部分もあることをお断りいたします。

**三宅 敏夫**(冶金・昭18) 腰痛で悩まされていますが元気で過ごしております。

**池田 拓夫**(冶金・昭19) 97才まだ元気で暮しています。

**小門 純一**(鉱山・昭22) 94才になり、体力の低下が顕著になって来ておりますが、何とか元気にしております。今年は同年令以上の方からの賀状が皆無となり、いささか淋しく感じております。

**寺井 士郎**(冶金・昭22) 同期会も高齢の為め参加不能の人が多く解散致しましたが、小生、脚が弱く転倒しない事を第一に、何とか元気に過して居ります。

**三谷 文夫**(鉱山・昭23) 馬齢を重ねて94年が過ぎました。まだ、ステッキを持たずに近所を1時間ほど散歩することを日課にしております。また、80歳を過ぎてから習いはじめた下手な水彩画の画題を求めて京都市内をうろちょろ歩きまわっております。水曜会のみますの発展を心から祈ります。

**小川 昌平**(鉱山・昭26) 何時の間にか白寿を通り過ぎました。

**武田 三雄**(鉱山・昭27) 元気で過ごしています。

**大久保 勝夫**(冶金・昭29) 米寿世代を迎えたS.29年組、同期の全大会は叶わなくなりましたが、東京近辺在住の3名組(青木・莊林・大久保)で、月一に会合しお互いの健在ぶりを確かめ合う一期一会の出会いを重ねています。

**中尾 修三**(冶金・昭29) 快調に過して居ります。

**清滝 昌三郎**(鉱山・昭30) 相変わらずの晴耕雨読。ゴルフはライオンズクラブ(110)を越えて猛獣(もう10)クラブ(120)に所属変えです。

**佐藤 史郎**(冶金・昭30) 平穏な毎日です。

**米津 栄次郎**(鉱山・昭31) 次の最終講義を聴き深い感銘を受けました。生涯教育のよすがにしています。

・理学研究科 土山 昭 教授

・アジアアフリカ研究科 小杉 泰 教授

**野村 悦二**(冶金・昭31) 世の中の変化の激しい中、歳以外の生活パターンは変化させずに過ごしています。この先、五輪、万博・歴史的イベントを楽しみたいと思います。

**松本 洋祐**(冶金・昭33) 右目失明、左目もうすれて書籍・新聞が読めなくなりました。ご盛會を祈ります。  
**久賀 俊正**(鉱山・昭35) ほうこうガン全摘出後、現在はキイトルーダ点滴治療中。

**岩崎 滋**(冶金・昭36) 鎖骨々折で養生中ですが、勤続致しております。

**小松 伸也**(冶金・昭36) 老化が進んでおります。

**井手 謙三**(鉱山・昭37) 腎不全により人工透析を受ける身になって3年経ちます。週3回各3時間位ですが、通院、待機時間等を加へると約5時間拘束されていますが、それ以外は普通の生活です。

**白井 勲**(鉱山・昭37) 勤務先としてしていた白井経営を、高齢等のため廃業しました。

**濱崎 敦**(冶金・昭38) 元気で京都の外国人観光客ボランティアガイドを続けています。

**高橋 堅之**(資源・昭40) ご案内、ありがとうございます。他事があり、出席できません。盛會を祈っています。

**望月 志郎**(資源・昭40) 歳なりに元気にしております。

**内山 良樹**(冶金・昭40) 定年退職後、相変わらず、週に2~3回体操、ボランティアと身体を動かしています。

**田中 完治**(資源・昭41) 久しぶりの水曜会出席を楽しみにしています。関係者の皆様に深く感謝しております。水曜会はもとより、いろいろな同窓会等で知り合いとあえるのが大きな楽しみになっています。

仕事を離れて一年、趣味、社会貢献など現役の時にはできなかったことを楽しみたいと思っています。

喜寿を迎えて加齢を実感し、医師・薬・健康番組・パンフレットなども仲良くなりました。

**横山 莞泰**(資源・昭41) 時折開発途上国等に滞在して過ごしています。

**森 邦彦**(冶金・昭41) 元気にいろいろなことを楽しんでおります。

**綿谷 英男**(冶金・昭41) あいにく当日他に予定がありますが、長く機械メーカーで関わってきた材料強度分野の直近のお話を伺いたく、津崎先生のご講演だけ

は何とか参加させていただきたいと思っています。

**岩坂 光富**(金属・昭42) 当日は所用があり欠席いたします。古墳探訪や花写真撮影等をのんびりと楽しんで日々を送っております。水曜会大会のご盛会をお祈り致します。

**井上 修**(資源・昭43) 昨年介護福祉士として岩国市医師会病院に勤務中。

**黒木 正純**(冶金・昭43) 「生涯現役」, 「生涯学習」で京都大学の恩を忘れず、感謝しながらピンピンコロリを目標に「自彊不息」(じきょうやまず)の日々です。

**高山 新司**(金属・昭43) 今年でヨーク大学の任期が終わり、その後は日本で、児童養護施設で子供達への支援のボランティア活動をする予定です。

**浅井 達雄**(資源・昭44) 元気になっています。中京学院大学の教壇に立つかわら、ロータリークラブの会長、中津川市の特別顧問、日本セキュリティ・マネジメント学会副会長の役を仰せつかっています。

**金澤 守**(冶金・昭44) 竹林の一愚の毎日です。

**池内 建二**(金属・昭44) おかげさまで元気に過しております。

**梶谷 幹男**(金属・昭44) 卒後50周年記念の年です。

**八十 致雄**(金属・昭44) 卒業50年経ち、初めて水曜会に出席させていただきます。

**高田 正良**(冶金・昭45) 元気しております。

**友田 陽**(冶金・昭45) 今年の春、4月から主たる勤務先が産総研になりました。時々、NIMSにも顔を出しています。

**平岡 裕**(冶金・昭45) 今年3月に特任教授の任期が終了しました。4月からフリーになりますが、時間の過ごし方に悪戦苦闘しています。

**萱原 徹男**(資源・昭46) 一日に一歩の前進。人事を尽くして、天命を待っている次第です。

**落合 庄治郎**(冶金・昭46) 先約の所用のため、申し訳ありませんが、欠席させていただきます。

**恩賀 伸二**(金属・昭46) 会社勤めの終盤、約10年米国大学で共同研究でした。しかしまだ研究の楽しい問題で大学との通信で結構毎日仕事していて、時々行き来しています。何か役に立っている間は、もう少し頑張ってみようと思っています。

**近藤 光博**(冶金・昭47) 母、息子夫婦、孫との4世代同居で、3日/週の高純度アルミ関係の技術指導と野菜作りをしています。

**卯田 清嗣**(資源・昭48) 平成28年3月に日鉄住金鋼板(現日鉄鋼板)を退職しました。

**牟田 潤**(資源・昭48) まだサラリーマンを続けています。丸の内の京大オフィスには、2カ月に1回程度行っています。たまには、京大オフィスで、講演会

を企画してはいかがでしょう。

**川崎 一博**(金属・昭48) 2018年6月に Netzlen を退職し、以後、京都百万遍の(公財)応用科学研究所の非常勤理事、研究員として毎月第3週京都に来ております。水曜会(今回)津崎先生のご講演があり、旧田村今男先生研究室出身者とも多くお会いできそうで楽しみです。よろしく願います。

**高橋 渉**(金属・昭48) あいにく、6/1は先約があり、いきたいのですが、いけません。

**福井 康司**(金属・昭48) まだ現役に働いています。1/3が東京、1/3が大阪、残りの1/3は海外を含む各地への出張という毎日です。

**柏井 善夫**(資源・昭49) オリエンタルコンサルタンツグローバルで海外勤務を続けています。現在はスリランカで斜面防災工事の施工管理に従事しております。

**小西 和幸**(金属系・昭49) 2016年に日立金属を退職し、自由を楽しんでいます。

**小西 延明**(金属系・昭49) 昨年11月に嘱託勤務満了で退職しました。

**高島 章**(金属系・昭49) 民泊を営んで世界とのつながりを維持しています。

**若松 正**(資源・昭50) 社会保険労務士はリタイヤしました。

**土屋 能成**(金属系・昭50) 所用により特別講演のみ参加させていただきます。よろしく願ひ致します。

**藤城 泰文**(金属系・昭50) 撰南大学(寝屋川市)で非常勤講師をしています。

**藤村 俊生**(金属系・昭50) H31工学博士(北海道大学)取得しました。

**伊藤 顯**(金属系・昭51) 42年余努めていたミズノ(株)を19年3月10日で完全退社しました。

**楠井 潤**(金属系・昭51) 東洋アルミで、世界を相手にアルミ粉末、アルミペーストを販売しています。最近特に、3Dプリンター用A1合金粉が注目されています。

**近森 洋二**(金属系・昭51) 平成31年3月をもって退職しました。

**岡本 昌直**(資源・昭52) 年金生活に入っています。

**平田 八郎**(資源・昭52) 10月23~25日京都にて第78回全国産業安全衛生大会が開催されます。大会テーマは「平安の思いを込めた京の地で新たに誓う安全と健康」です。多数の皆様参加をお願いします。

**津崎 兼彰**(金属系・昭52) 九州大学に異動して7年目で、最後の年です。M2が6名とB4が5名の研究室です。今年の水曜会大会では特別講演の講師を務めます。よろしく願ひいたします。

**日比野 立夫**(金属系・昭52) 卒業以来、日本パーカライジングに勤務しておりましたが、平成27年3月に退職して、その後は滋賀の実家にて暮らしております。

**谷村 晶夫**(金属系・昭53) 昨年3月末に本社に戻りましたが、5月から3ヶ月程札幌に単身赴任予定です。三人娘も独立し、家では妻と2人暮らします。

**元山 義郎**(金属系・昭53) 元気でがんばっております。

**竹士 伊知郎**(金属系・昭54) サラリーマン生活は卒業しましたが、大学講師、社会人向けの統計・品質管理関連のセミナー講師、ISO 9001 審査員など、それなりに忙しくいたしております。

昨年、日科技連出版社から「学びたい知っておきたい統計的方法」なる書籍を上梓しました。統計や品質管理を基礎から学び実務で正しく使いたいと思っておられる、企業人や学生の方々に広く読んでいただければと念じております。

**兵藤 知明**(金属系・昭54) 物質・材料研究機構を定年退官し、経済産業省系の新構造材料技術研究組合(ISMA)に勤務しております。

**宮川 裕**(金属系・昭54) 病気療養中のため、欠席します。

**北村 公亮**(資源・昭55) 京都に転居して丸5年が経ちました。機会がありましたら町家カフェ檸檬にもお立ち寄りください。

**竹川 禎信**(金属系・昭55) 現在、大阪京橋で環境省の補助金を取り扱う仕事をしています。

**寺岡 卓治**(金属系・昭55) 本年8月は、大学院1年のときに北海道旅行をともにした同期4人でウン十年ぶりの再会をすることになりました。

**平田 敏幸**(資源・昭56) 通算25年のカナダ駐在を終え、2017年6月から東京にて勤務しております。

**札軒 富美夫**(金属系・昭56) 昨年に続き、今年も参加させていただきます。特別講演会を楽しみにしております。

**安部 研吾**(金属系・昭57) エンジニアとして鉄鋼材料に関わり、現在は経営者の一人として電子材料に関わっています。水曜会大会のご盛会を祈念いたしております。

**有元 真人**(金属系・昭57) トヨタ自動車で燃料電池システム開発を担当しています。燃料電池関係のご用命はなんでもよろしく願いいたします。

**汲川 雅一**(金属系・昭57) 住友林業(株)出資のSORAA Japan(株)にて引き続きSORAAの製品の販売に関わっています。

**中西 栄三郎**(金属系・昭57) 長野県安曇野の自宅から東京本社に通っています。前職の自動車産業への復

帰を検討中です。

**西尾 将伸**(金属系・昭57) 初めて参加させていただきます。

**水谷 康朗**(金属系・昭57) 同期の田中教授に会えるとうれしいです。

**竹内 正**(金属系・昭58) CASE, MaaSなどが現われると人やモノの移動が増えて、移動手段のクルマの重要性はさらに増すと思われます。稼働率が増えるので早く壊れ始めるため、丈夫な日本車を今まで以上に供給できるよう努めて参ります。

**田中 晶**(金属系・昭58) 東京工業高等専門学校に勤務しております。

**湊 万寿男**(金属系・昭58) 益々製造が難しい品種が増えてきましたが、少しでも良い製品が造れるよう努力しているつもりです。津崎先生、長い間お疲れ様でした。

**岡 一宏**(金属系・昭59) 少なくとも、今回の特別講演会は、出席聴講させていただきたいと思っております。

**坂東 誠治**(金属系・昭59) 日鉄テクノロジー和歌山事業所にいます。

**藤野 真**(金属系・昭59) 日鉄ロールズ株式会社に移り、3年目になり、福岡県北九州市で勤務しております。

**廣口 貴敏**(資源・昭60) 2018年4月に大阪製鐵株式会社に移籍しました。

**古谷 精市**(金属系・昭60) 業務内容等変わらず、元気に頑張っております。

**木下 啓藏**(金属系・昭61) NECからの出向という形で、シリコンフォトリソという技術分野の半導体ベンチャー企業、アイオーコア株式会社におります。半導体デバイス製造用のプラズマプロセス技術の仕事を卒業以来続けています。先日、(公社)応用物理学会の理事を拝命しました。

小生の代は同窓生の小西英登君の声掛けで時々集まっています。

**木村 得敏**(金属系・昭61) 単身赴任して6年目になります。

**村上 裕道**(資源・昭62) 今回は他用のため全プログラムの参加が叶いませんので、恐縮ですが特別講演のみの参加とさせていただきます。

**奥村 英之**(金属系・昭62) 今年は行事係で大変ですが、鋭意努めさせていただきますので宜しく願い致します。

**堂ヶ原 満**(金属系・昭62) 社会に出て早や30年。環境変化のうねりの中で、潜ったり沈んだりしながら、まあなんとか元気にやっております。ご盛会をお祈り

申し上げます。

**岡部 徹**(金属系・昭63) いつもとかわらずチタンの製錬とレアメタルのリサイクルの研究を続けています。

**吉房 宏之**(資源・平1) 大変ご無沙汰しております。もう50半ばに差ししかろうとしておりますが、未だエンジニアとして頑張っております。水曜会大会がご盛会となることをお祈りしております。

**西尾 裕司**(金属系・平1) 平成元年に卒業してあつという間に30年が経過しました。昨年、吹田は地震・豪雨・台風と続いて大変でした。

**牧野 博之**(金属系・平1) これまで全くご無沙汰でしたが、関西方面に行く機会に恵まれたので参加してみようと思います。

**磯崎 誠一**(金属系・平2) 特別講演を初めて聴講させていただきます。よろしく願いいたします。

**上西 朗弘**(金属系・平4) 新社名となり気分も新たに研究開発に取り組んでおります。ご盛會を祈念します。

**鶴田 明三**(金属系・平4) 2016年12月に三菱電機株式会社を退職。2017年1月に独立。製造業の設計・開発コンサルティング会社「株式会社ジェダイト」を設立。 <https://data-engineering.co.jp>

**荻野 剛正**(金属系・平4) 現在、中国大連に単身赴任中。2020年1月に帰国予定です。

**久禮 宗典**(金属系・平6) 無電力発光材料の開発をする会社 株式会社Izumi Delightを本年設立しました。

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

**武内 淳**(資源・平7) 東名高速道路全線開通が5月26日に50周年を迎えました。現在東名、新東名の維持管理業務に携わっています。

昨年と一昨年は、海外各国からの留学生に日本の高速道路への理解を深めてもらうよう、名古屋大学で非常勤講師を務めました。

**秋山 尚久**(金属系・平7) 長期出張の為、家を離れております。

**大竹 康一郎**(金属系・平8) 名簿をネットでアクセ

スできるようにして下さい。

**安井 雅人**(物理工・平10) 昨年7月の西日本豪雨で倉敷市真備町にて被災しました。家族、親族が元気であるのが救いでした。今は再建が課題です。

総会は所用があり、欠席させていただきます。盛會をお祈りしております

**上山 正樹**(物理工・平14) 2019年3月からヒューストン駐在となりました。

**八木 俊介**(物理工・平14) 現在、客員研究員としてMITに1年ほど研究滞在中です。

**堀内 尚紘**(物理工・平15) 転職しました。

**松長 剛**(地球工・平16) 知命を迎えるにあたり、今一度自身の命に見つめ直す一年にしたいと思います。

**三ヶ田 均**(現教官) 出張で出席適わず、申し訳ありません。

**段野 勝**(元教官) 何とか元気に過しています。

**山岡 幸男**(元教官) 57年間、金属材料技術者として仕事をしてきましたが、自由にやっていたつもりでもやはりストレスはあったのでしょうか？ 75才で完全リタイヤして約2年。現在が最っとも体調良好です。やはりストレスは健康にはよくない？

**小岩 昌宏**(元教官) 年1回の水曜会大会を楽しみにしているのですが、今年はほかの会合と重なるので欠席します。

数年来、ホームページから出欠を届けようとして、いつも失敗していました。今年、ようやく成功しました。毎年、入力の手順がわかりにくいので、改良していただくようお願いしていたのですが、一向に改善されませんでした。

どこがわかりにくかったか？

大会の出欠だけなら、「本人の氏名と出欠」のみ入力すればよいと思うのだが、その前に“本人確認”の儀式がある。その際、漢字だけでなく、よみ(ひらがな)の入力が求められる。それでようやく、大会出欠に進むのだが、“近況報告”という欄がある。

**奥 健夫**(元教官) いつもありがとうございます。琵琶湖のほとりでこつこつとやっております。

## 平成 31 年 3 月 卒 業 者 名 簿

## 旧 資 源 系

## ● 学部卒業生

氏 名	研究論文題目	就 職 先
<b>応用地球物理学分野 (旧 ジオフィジクス分野)</b>		
植 田 樹	人工貯留層の造成による超臨界地熱資源開発の実現可能性	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
川 部 瑞 貴	メタンハイドレート層における地震波減衰推定の基礎的研究	(株)ベイカレント・コンサルティング
酒 見 祐 一	地下の流体移動に伴う地震動を用いる貯留層モニタリング手法の研究	東京大学大学院工学系研究科(修士課程進学)
益 邑 遼	多孔質媒質の浸透率異方性の研究	京都大学大学院工学研究科(修士課程進学)
<b>地殻開発工学分野</b>		
下 田 晃 嘉	岩種の違いが水圧破砕挙動に与える影響の研究	京都大学大学院工学研究科(修士課程進学)
田 中 壘	花崗岩供試体を用いた室内水圧破砕実験による破砕プロセスの粘性依存性の研究	京都大学大学院工学研究科(修士課程進学)
土 田 侑 秀	凝灰岩の強度に及ぼす周辺環境の影響	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
前 崎 智 史	海水環境下における破壊した高強度高緻密コンクリートの透水性の変化	京都大学大学院工学研究科(修士課程進学)
<b>計測評価工学分野</b>		
酒 林 圭 介	80/20 砂ベントナイト混合土の転圧施工に起因する不均質性の評価	五洋建設(株)
高 橋 祐 貴	光ファイバ加熱法による粒状ベントナイト密度キャリブレーション手法の解析的検討	京都大学大学院工学研究科(修士課程進学)
舘 祐 史	鋼線材の渦電流探傷における最適バイアス磁界について	京都大学大学院工学研究科(修士課程進学)
前 田 梨 帆	多重周波数を用いた鋼棒欠陥の渦電流探傷信号処理	京都大学大学院工学研究科(修士課程進学)
<b>地殻環境工学分野</b>		
犬 飼 郁 也	バンドン盆地周辺の地熱サイトにおける $^3\text{H}$ と $^{129}\text{I}$ を用いた地熱流体の起源と滞留時間の推定	京都大学大学院工学研究科(修士課程進学)
権 守 宏 明	ハイパースペクトル衛星画像による植生域での熱水変質帯の抽出精度向上	京都大学大学院工学研究科(修士課程進学)
下 地 悠	日本の金属鉱山の金属元素濃度と鉱物組成の資源地質学的特徴抽出	京都大学大学院工学研究科(修士課程進学)
中 村 友 洋	地中レーダー波形のスペクトル解析による地下空洞規模の推定	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
<b>地球資源システム分野</b>		
石 井 幹 人	CNF 含有 CO <sub>2</sub> フォームの安定性評価	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
佐 野 暉	熊本地震の震源断層掘削コア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)
村 瀬 佑 樹	CNF ナノエマルジョンの圧入プロファイル改善法への適用性の検討	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
<b>資源エネルギーシステム学分野</b>		
田 邊 雄 亮	炭酸カルシウムを利用した細胞脱着	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
平 松 大 樹	真三軸圧縮応力条件下での水圧破碎実験により頁岩中に造成される亀裂の観察	名南 M&A(株)
廣 瀬 蒼 矢	銅めっきを利用したアルミニウムエンボス板の接合によるポーラスアルミニウムの創製	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
牧 拓 也	細胞接着に対するナノポーラス金の孔径の影響	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
<b>資源エネルギープロセス学分野</b>		
塩 入 悠 太	移動高温固体面に衝突する水液滴の流体力学的挙動	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
寺 崎 健 悟	水冷却の熱伝達特性に対する平板速度の影響	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
畠 山 健太郎	種々の時効処理を受けたチタン合金板における弾塑性変形挙動	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
松 浦 遼	純チタン JIS 2 種板の円筒絞り成形における異方変形挙動	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
<b>ミネラルプロセッシング分野</b>		
上 田 雄 輝	エネルギー作物のメタン発酵収率向上に関する研究	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
白 川 稜 治	分子動力学シミュレーションを用いたメタンハイドレートにおける CO <sub>2</sub> -CH <sub>4</sub> ガス置換メカニズムの解明	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
末 廣 亮 馬	湿式法による製鋼スラグのリサイクリングに関する基礎的研究	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
内 藤 江 兎	ハイドレートをを用いた天然ガス輸送の新たな添加剤の開発	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)

## ● 修士課程修了者

氏 名	研究論文題目	就 職 先
<b>応用地球物理学分野 (旧 ジオフィジクス分野)</b>		
岩 田 優 生	配管内の局所的スケーリング及び減肉現象の流体物理学的解析	国際石油開発帝石(株)
大 谷 颯	個別要素法を用いた超深部地熱開発における水圧破砕シミュレーションの基礎研究	国際石油開発帝石(株)
渡 邊 勇 介	地震波干渉法による擬似クロスダイポール記録を用いたS波速度異方性パラメータ推定法の研究	京都大学大学院工学研究科 (博士課程進学)
<b>地殻開発工学分野</b>		
金 子 眞 士	Generalized Inversion Technique を用いた AE 観測データのスペクトル解析	(株)FUNDBOOK
岸 本 恭 暢	水と CO <sub>2</sub> を用いた黒部地点水圧破砕実験における AE 震源メカニズム推定	住友金属鉱山(株)
本 庄 佑 馬	Acoustic Emission 測定データに対する相対モーメントテンソル解析の適用	日立建機(株)
山 本 和 畝	室内水圧破砕実験時に生じる Acoustic Emission の震源メカニズム推定	(独)石油天然ガス・金属鉱物資源機構
<b>計測評価工学分野</b>		
井 長 悠	吊橋ハンガーロープ端末部の非接触超音波検査法	川田テクノシステム(株)
杉 山 佑 樹	地形を考慮した地下空洞周辺岩盤の潮汐応答解析	(公)鉄道総合技術研究所
堀 田 直 豊	銅板裏面欠陥の渦電流探傷におけるバイアス磁界の効果	日本製鉄(株)
木 村 哲 二	Level Set 法を用いた電気ポテンシャル法による裏面欠陥形状の推定	パナソニック(株)
山 岡 大 樹	レーザーアブレーションを用いたコンクリート剥離欠陥の励起振動	(公)鉄道総合技術研究所
<b>地殻環境工学分野</b>		
岡 嶋 純 也	Clarification of mass transport properties around a fault by reactive transport analysis considering water-rock interaction (水-岩石反応を考慮した反応輸送解析による断層周辺の物質移行特性の把握)	JX 金属(株)
切 山 拓 也	地質情報とスケール則を考慮した地球統計学による鉱石品位モデリングの精度向上	三井ホーム(株)
小 路 久 稔	地磁気地電流法による地下比抵抗構造の信頼度評価法の開発	(株)アイレップ
堀 太 至	環境トレーサー分析と物質移行解析による都市域での地下水滞留時間推定の高精度化	(株)SRD

氏 名	研究論文題目	就 職 先
<b>地球資源システム分野</b>		
栢 本 悠 大	コア変形法 (DCDA) の改良及びそれを用いた地殻応力測定	国際石油開発帝石株
西 本 尚 矢	Improving Injectivity of Cellulose Nanofiber by Nano-Emulsification (ナノエマルジョン化によるセルロースナノファイバーの圧入性改善に関する研究)	大阪府庁
日 高 悠 貴	Molecular Dynamics Study for Understanding Interaction of Asphaltene Molecules and Construction of Digital Oil (アスファルテン分子の相互作用理解とデジタルオイル構築を目的とした分子動力学検討)	(株)日立製作所
矢 野 将 伍	In-situ stress measurements in the vicinity of the Nojima fault using drilling cores by anelastic strain recovery and diametrical core deformation analysis (掘削コアを用いた非弾性ひずみ回復法とコア変形法による野島断層近傍の応力測定)	日鉄ソリューションズ(株)
<b>資源エネルギーシステム学分野</b>		
青 木 勇 太	マイクロ/ナノポーラス材料を用いた曝気-過硫酸法による水中の有機物の除去	積水化学工業(株)
榊 原 迪	Origin of Short-range Antibacterial Activity of Noble Metals and its Application (貴金属における近接抗菌作用の発現と応用)	日本製鉄(株)
杉 山 博 信	Detachment of cells and cell sheets using inorganic materials (無機材料を用いた細胞および細胞シートの脱着)	東京工業大学 (博士課程進学)
出 口 聡一郎	Dynamic analysis on integrin inactivation by surface effect of nanoporous Au (ナノポーラス金の表面効果によるインテグリン不活性化の動的解析)	京都大学大学院エネルギー科学研究科(博士課程進学)
山 野 友 梨子	Joining of Fe sheets by copper electrodeposition (銅めっきを利用した鉄シートの接合)	ソニー(株)
<b>資源エネルギープロセス学分野</b>		
武 下 大 成	Deformation behavior of droplet train impingement on moving hot solid (移動高温固体面に対する液滴列衝突挙動)	新日鐵住金(株)
永 田 恵 督	Boiling heat transfer characteristics of water jet to high-speed moving plate (高速移動体水噴流冷却の沸騰熱伝達特性)	パナソニック(株)
中 辻 雄 也	Quasi-static deformation characteristics of metastable $\beta$ -titanium alloy sheets aged at various conditions (種々の時効処理を施した準安定型 $\beta$ チタン合金板における準静的な変形特性)	新日鐵住金(株)
平 野 夏 帆	Crystal-plasticity finite-element analysis of cup drawing of a commercially pure titanium Grade 2 sheet (純チタン2種板の円筒絞り成形に関する結晶塑性有限要素解析)	川崎重工業(株)
八 木 翔 吾	Plastic flow of a 6022-T4 aluminum alloy sheet under various linear and nonlinear loading paths (種々の比例および非比例荷経路における6022-T4アルミニウム合金板の塑性流動)	パナソニック(株)

氏 名	研究論文題目	就 職 先
<b>ミネラルプロセス分野</b>		
杉 村 渉	Pretreatment and supplement of anaerobic digestion for second and third generation biomass (第二世代および第三世代バイオマスへのメタン発酵の適用に向けた前処理と途中処理の研究)	日東電工(株)
塚 越 詩 織	界面化学的方法による腐植質を含む粘性土の分級洗浄	環境省

### ● 博士後期課程修了者

氏 名	研究論文題目	就 職 先
<b>資源エネルギーシステム学分野</b>		
宮 澤 直 己	Atomic and electronic analysis of interactions between nanoporous Au and proteins (ナノポーラス金とタンパク質の電子・原子論的相互作用解析)	東京工業大学
<b>資源エネルギープロセス学分野</b>		
久 保 雅 寛	薄鋼板のプレス成形品の表面品位向上に関する研究	新日鐵住金(株) 社会人ドクター

### ● 博士学位授与者 課程博士

氏 名	研究論文題目	主 査	取得年月日	備 考
<b>応用地球物理学分野 (旧 ジオフィジクス分野)</b>				
Ehsan Jamali Hondori	Full waveform inversion of super-shot-gathered data for optimization of turnaround time in seismic reflection survey	三ヶ田 均	平成28年11月24日	
木 村 俊 則	南海トラフ地震発生帯付加体内部における主応力方位・水平差応力分布の地震学的研究	三ヶ田 均	平成29年1月24日	
<b>資源エネルギーシステム学分野</b>				
宮 澤 直 己	Atomic and electronic analysis of interactions between nanoporous Au and proteins (ナノポーラス金とタンパク質の電子・原子論的相互作用解析)	馬 渕 守	平成31年3月25日	
<b>資源エネルギープロセス学分野</b>				
久 保 雅 寛	薄鋼板のプレス成形品の表面品位向上に関する研究	宅 田 裕 彦	平成30年9月25日	

## 旧 金 属 系

## ● 学部卒業者

氏 名	研究論文題目	就 職 先
<b>材料設計工学分野</b>		
加 藤 勇 一	X線 Operando 解析による全固体電池の蓄電池反応解析	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
田 中 誠 人	金属空気電池の酸素極アモルファス材料 $\text{Ca}_2\text{FeCoO}_5$ の遷移金属環境構造	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
藤 村 雄 斗	亜鉛空気電池における強アルカリ性水溶液中の亜鉛イオンの環境構造	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
安 田 拓 海	金属ナノワイヤー複合厚膜電極の電池特性	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
<b>表面処理工学分野</b>		
浅 原 脩 悟	液相共存による固体酸化物・塩の水和反応の高速化およびその機構の解明	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
大 倉 慎 史	析出メカニズム解明に向けた亜鉛の電解析出のその場観察	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
齋 藤 直 樹	アルカリ水溶液中における錫および錫はんだの酸化浸出反応機構	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
藤 井 健 雄	統計力学に立脚した固体内拡散の理論解析	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
<b>物質情報工学分野 (旧 プロセス設計学分野)</b>		
奥 野 雄 介	熱輻射による蛍光 X 線スペクトル変化	(株)村田製作所
小 澤 叶 夢	液体の帯電・放電現象の研究	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
小 屋 雄 亮	回折と散乱による X 線偏光の研究	(株)リブセンス
武 久 和 聖	90度コンプトン散乱の基礎研究	兵庫県教育委員会
羽 仁 健 登	焦電結晶の旋光性に関する研究	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
松 本 雄 樹	入射 X 線スペクトル補正による蛍光 X 線分析の高精度化	西日本旅客鉄道(株)
<b>ナノ構造学分野</b>		
瀬戸山 巧	多元系の構造自由度の非調和性	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
田 中 祐 輝	酸化物およびリン化合物仮想基板上への $\text{ZnSnP}_2$ 成膜	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
橋 本 さつき	$\text{ZnSnP}_2$ におけるバルク表面と光学特性との相関	岡山大学医学部
三 宅 遼 吾	特異値分解に基づく新規射影状態の構築	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
<b>先端材料物性学分野</b>		
相 羽 柚 香	STMと赤外分光法によるAg表面に形成される炭素ナノ構造の検討	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
梶 田 駿 汰	組成傾斜領域をもつAl合金の変形中の組織変化の解析	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
下 中 季 晋	純Cobalt Shanditesの劈開面の構造と表面電子状態の相関	(株)みずほ銀行
山 崎 直 人	軟X線GISAXS法によるブロック共重合体マイクロ相分離構造の深さ分布解析	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
<b>量子材料学分野</b>		
井 上 誠 也	第一原理計算による二元化合物の電子状態に基づいた化学結合の評価	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
西 航 平	特異値分解を用いた結晶構造探索手法の開発	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
藤 田 健	物質推薦システムと低温合成による新規擬三元系二価スズ酸化物の探索	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
松 本 晋太郎	物質データベースとテンソル分解を用いたイオン記述子の作成と評価	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
森 光 佑 太	合成条件推薦システムの精度向上に向けたモデル改善手法の検討	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
<b>結晶物性工学分野</b>		
大 影 晃 平	Mg-Zn-Y系LPSO相化合物のa軸圧縮で現れる変形帯	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
織 田 一 希	Fe-C二元系パーライトのマイクロピラー圧縮変形	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
濱 田 鉄 也	Fe-Ni-Ge三元系相平衡と組織制御	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
松 浦 周太郎	BCC型等原子量ハイエントロピー合金の塑性変形	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
松 宮 久	$\eta$ -Fe <sub>2</sub> Al <sub>5</sub> 単結晶のマイクロピラー圧縮変形	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
<b>構造物性学分野</b>		
加 山 達 也	微細粒組織を有する22Mn-0.6C TWIP鋼における動的ひずみ時効	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
田 鎖 悠 一	Dual-Phase鋼の結晶粒微細化による局部延性向上機構の解明	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
山 下 元 気	CoCrNi中エントロピー合金の変形メカニズムと粒径依存性	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
吉 村 卓 磨	B2金属間化合物粒子を有するFe-Mn-Al-Ni-C合金の引張変形特性	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
<b>先端材料機能学分野</b>		
菅 健	Fe-Cr-Ni 系凝固組織観察によるマッシュ的変態の選択組成範囲	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
中野 敬太	CrMnFeCoNi 系ハイエントロピー合金の固液間溶質分配とデンドライト成長の定量解析	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
鳩野 翔	炭素鋼を用いたモデル実験による中心偏析の再現	ヤマトスチール(株)
福田 大祐	周期的外力下における固液共存体の力学挙動と偏析形成の検討	東京大学大学院工学系研究科マテリアル工学専攻
<b>磁性物理学分野</b>		
大澤 燎平	MgYCo <sub>4</sub> の作製とその遍歴磁性	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
岸 龍兵	フラストレート磁性体 ZnFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> 単結晶の育成および構造・磁性評価	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
木原 史瑛	一軸異方性を有する強磁性体 CrGeTe <sub>3</sub> , Cr <sub>5</sub> Te <sub>8</sub> のキュリー温度近傍での磁気異常	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
武井 愛美	La-Sr-Ca Co フェライト単結晶の育成と磁性	(株)みずほ銀行
田中 大輔	永久磁石材料 Co 置換 La-Na M 型フェライト単結晶の合成と磁性評価	京都大学大学院エネルギー科学研究科 (修士課程進学)
山下 史	高濃度 La-Co 置換 M 型 Sr フェライトの磁石化	日鉄テックスエンジ(株)
<b>材質制御学分野</b>		
川田 稀士	ヒドロニウム溶媒和イオン液体におけるホッピングキャリア	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
高井 亮太	water-in-salt を用いた Al 合金の電解エッチング	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
宮本 智行	Pt 触媒 Si エッチングで形成されるヘリカルポアのキラリティ制御	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
宮本 真之	銅電解精製における異常析出に関わる電流分布シミュレーション	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
山上 晶暉	添加剤含有浴から電析した金属 Li の表面解析	京都大学大学院エネルギー科学研究科 (修士課程進学)
<b>機能構築学分野</b>		
市川 智士	原子分解能 AFM による固体-ハイドレートメルト界面の構造分析	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
岡出 健太郎	光表面活性化による PET と COP の接合	東京大学大学院工学系研究科 (修士課程進学)
島川 紘	酸化グラフェンによるシリコンのパターンエッチング	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
地中 健	液体金属-固体界面分析のための温度可変 AFM の開発	北陸電力(株)
宮下 匠人	銅表面への SAM 被覆 - 基板洗浄方法依存性 -	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
<b>エネルギー社会工学分野</b>		
磯野航也	ボールレスミリングによるミリング効果の検討	(株)毎日放送
小嶋理記	硫酸アルミニウムによる悪臭原因物質分解能の評価	三菱商事(株)
鳥居和真	Ru 触媒によるアンモニア合成反応における活性化エネルギーの要因検討	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
難波大輝	強塩基性条件での二酸化炭素還元における電極金属種の影響	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
<b>量子エネルギープロセス分野</b>		
木村考岐	ニオブドープ酸化チタンナノロッドの作製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(修士課程進学)
<b>材料プロセス科学分野</b>		
岡本和也	脱合金法による電池集電体用ポーラスアルミニウムの作製	東京大学大学院工学系研究科(修士課程進学)
田中優也	アルミニウムイオン二次電池の電解液の検討	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
藤澤彩夕	ミスト CVD 法で作製した Pt 修飾 Mo 電極の水素発生性能の評価	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
米谷 怜	ミスト CVD 法による $Ni_{1-x}Mg_xO$ 薄膜のエピタキシャル成長とバンドギャップ制御	学校法人福田学園 大阪工業技術専門学校
渡邊伊織	ペロブスカイト型有機マンガンの塩化物の作製に関する研究	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
<b>プロセス熱化学分野</b>		
齋藤啓次郎	$Fe_xO-CaO-SiO_2$ 系酸化物融体中の $Fe_xO$ 活量の測定と溶体モデル	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
松下直也	液体 Cu 中の硫黄活量係数に及ぼす Fe 添加の影響	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
光山童夢	ガス-スラグ平衡法による $CaO-Al_2O_3-CaF_2$ 系スラグの Sulfide capacity 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)
吉岡雄太	超伝導接続のための{110}<110>集合組織 Ag テープを基材とした $GdBa_2Cu_3O_7$ 高温超伝導線材の研究	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
渡邊武之	カルシウムフェライトの凝固過程における生成物と TTT および CCT 線図	日本軽金属(株)

## ● 修士課程修了者

氏 名	研究論文題目	就 職 先
<b>材料設計工学分野</b>		
今 西 功 一	カルコゲナイド系 GeSbTe 光相転移物質のフェムト秒レーザー励起による光物性変化の構造依存性	(株)神戸製鋼所
島 洋 輔	層状岩塩リチウムイオン二次電池正極材料の構造安定化における遷移金属元素の役割	(株)村田製作所
周 嘯 宇	The Synthesis and Electrochemical Characterization of MoS <sub>2</sub> Nanosheet and Graphene Composite Films (MoS <sub>2</sub> ナノシートとグラフェンを用いた薄膜形成と電気化学的特性)	住友電気工業(株)
速 水 脩 平	金属フッ化物薄膜表面の構造・電子状態解析	新日鐵住金(株)
<b>表面処理工学分野</b>		
久 野 健 治	MgO-NiO 固溶体をアノードに用いたプロトン伝導セラミック型燃料電池	中部電力(株)
服 部 和 樹	第一原理 PES 解析に基づくプロトン伝導性酸化物の新規材料探索	住友金属鉱山(株)
安 井 詔 子	低温化学蓄熱材の開発に向けた硫酸イットリウムの脱水・水和挙動の解析	富士ゼロックス(株)
<b>物質情報工学分野 (旧 プロセス設計学分野)</b>		
堤 麻 央	3D プリンタによる X 線分析装置開発	関西電力(株)
宮 本 貴 博	キュムラントの Tsallis エントロピーの応用	(株)野村総合研究所
山 崎 慶 太	鉄鋼材料の高精度定量化	伊藤忠丸紅鉄鋼(株)
<b>ナノ構造学分野</b>		
桑 野 太 郎	ZnSnP <sub>2</sub> 太陽電池における界面構造とキャリア輸送特性との相関	京都大学大学院工学研究科 (博士後期課程進学)
田 畠 慎 也	配位空間上の幾何学に基づく合金の多体相互作用の逆予測	アクセンチュア(株)
YANG Yuming	Phosphidation mechanism of In affected by cap layer and Mo-related underlying layer	東芝メモリ(株)
<b>先端材料物性学分野</b>		
近 都 康 平	LPSO 構造形成過程におけるクラスター局所構造変化	パナソニック(株)
<b>量子材料学分野</b>		
川 畑 慧士郎	結晶構造のグラフ特徴量に基づいた材料物性値予測手法の開発	(株)エクサウィザーズ
香 西 景 太	推薦システムを用いた並列錯体重合法による新規複合酸化物の合成	(株)ギガフォトン
近 藤 大 介	半教師あり学習およびベイズ推定による線形回帰ポテンシャルの高精度推定	住友電気工業(株)
溝 上 慧 祐	フォノンボルツマン方程式に基づいた SiO <sub>2</sub> 多形の第一原理熱伝導率計算	京都大学大学院工学研究科 (博士後期課程進学)

氏 名	研究論文題目	就 職 先
<b>結晶物性工学分野</b>		
浅 倉 誠 仁	FCC 構造を有する Cr-Mn-Fe-Co-Ni 高エントロピー合金の機械的特性に及ぼす合金組成の影響	日鉄ステンレス(株)
門 田 信 幸	セメントタイトおよびパーライト単結晶のマイクロピラー圧縮変形	(株)IHI
福 山 貴 義	TM <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> (TM = Ti, Nb, Mo) 型遷移金属シリサイドのマイクロピラー圧縮変形	JFE スチール(株)
金 振 謙	HCP-Ti 単結晶のマイクロピラー圧縮変形	JFE スチール(株)
苏 怡	Micropillar compression deformation of (Fe,Ni) <sub>2</sub> Nb ternary Laves phase compounds	Western Digital Corporation
<b>構造物性学分野</b>		
岡 田 和 歩	2Mn-0.1C フェライト鋼の水素脆性破壊挙動	京都大学大学院工学研究科 (博士後期課程進学)
松 林 領 汰	マルテンサイト分布状態の異なる Dual-Phase 鋼の変形挙動	日本製鉄(株)
侯 菲 菲	3Mn-0.1C 中 Mn 鋼における加工熱処理による組織形成とその力学特性	(株)神戸製鋼所
張 元	高温加工熱処理された鉄含有純チタンにおける超微細粒組織の形成と力学特性	帰国
<b>先端材料機能学分野</b>		
清 尚 暉	Ti 添加炭素鋼におけるマッシュ的変態の定量評価	大同特殊鋼(株)
東 森 稜	固液共存体の力学モデルの構築とマクロ偏析予測への応用	(株)UACJ
橋 本 隆 弘	4D-CT による Fe-C 系のマッシュ的変態における組織形成の解明	(株)堀場製作所
藤 本 誠	時間分解 X 線イメージングを用いた $\alpha + \beta$ 型 Ti 合金の $\beta \rightarrow \alpha$ 変態のその場観察	住友電気工業(株)
<b>磁性物理学分野</b>		
井 上 剛	磁気異方性増強を目指した SrM 型フェライトにおける A サイト制御による Co 置換サイトの局所歪み導入	
河 村 拓 郎	核磁気共鳴法を用いたカゴメ格子磁性体 Co <sub>3</sub> Sn <sub>2</sub> S <sub>2</sub> の弱磁場領域におけるスピンドイナミクスの研究	三菱重工(株)
中 辻 健 太	フラストレート磁性体 ZnFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> のスピングラス様磁性	(株)村田製作所
<b>材質制御学分野</b>		
栗 原 将 人	濃厚水溶液を用いた Al の電解エッチング	日産自動車(株)
櫻 井 彬 裕	添加剤の協働作用による金属 Li の平滑電析	(株)野村総合研究所
前 田 有 輝	格子欠陥を有する 3C-SiC の腐食機構	京都大学大学院工学研究科 (博士後期課程進学)

氏 名	研究論文題目	就 職 先
<b>機能構築学分野</b>		
石 塚 隆 高	酸化グラフェンアシスト Si エッチング	(株)神戸製鋼所
板 倉 和 幸	電気化学 AFM による Si 電極-イオン液体界面の構造分析	(株)UACJ
岡 本 克 文	酸化グラフェンの hard VUV 光還元	サンディスク(株)
村 田 真	液体金属-固体界面構造の原子レベル AFM 解析	JFE スチール(株)
林 立 庭	チタンと高分子材料の VUV 表面活性化接合	サンディスク(株)
<b>エネルギー社会工学分野</b>		
山 下 正 峻	界面電荷移動現象を利用した g-C <sub>3</sub> N <sub>4</sub> の光触媒性能	DOWA ホールディングス(株)
田 中 雄 大	光触媒の研究に用いられる正孔犠牲剤の役割の検証	日鉄エンジニアリング(株)
安 永 玲 華	タイにおける高効率エアコン普及促進政策の社会影響評価	三菱日立パワーシステムズ(株)
高 木 宣 俊	強磁性/反強磁性複合膜の磁気特性による薄膜の物性制御	パナソニック(株)
濱 田 海 里	RF スパッタ法で作製した AZO 透明導電膜特性における基板表面ラフネスの影響	関西電力(株)
遠 藤 啓 史	メカニカルミリングによるポリエチレンの分解反応	みずほ情報総研(株)
若 園 直 樹	メカニカルミリングによる Z スキーム型光触媒 Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Cu <sub>2</sub> O の作製と光触媒水分解性能の評価	ダイキン工業(株)
<b>量子エネルギープロセス分野</b>		
アムザムハンマド (Muhammad Amzar)	Preparation of PbS nanoparticles for solar cells	ハサヌディン大学
姜 亮 遠	$\pi$ 共役系ドナー・アクセプターを含有する電界紡糸ファイバーの作製とエネルギー移動の評価	Dongjin Semichem(株)
酒 井 佑 輔	中赤外自由電子レーザーによるチタン酸ストロンチウムにおける選択的格子振動励起	東京ガス(株)
佐 藤 央 至	中赤外自由電子レーザーによるダイヤモンドにおける選択的格子振動励起の実証	ローム(株)
林 高 弘	硫化アンチモンナノ構造体の作製と太陽電池への応用	(株)デンソー
山 田 凌 司	中赤外自由電子レーザーによるメチルアンモニウム鉛ハライドにおける選択的格子振動励起	東芝メモリ(株)
<b>材料プロセス科学分野</b>		
石 井 俊 匡	銅電解アノードスライムの湿式塩化処理における金の浸出挙動	(株)島津製作所
小 山 貴 志	多孔質アルミニウム膜の作製	TOWA(株)
春 田 優 貴	ミストデポジション法による CsPbBr <sub>3</sub> 膜の作製と評価	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)
股 村 雄 也	ミスト CVD 法による二酸化モリブデン薄膜のエピタキシャル成長	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)

氏 名	研究論文題目	就 職 先
<b>プロセス熱化学分野</b>		
大 嶋 祐 介	溶銑予備処理における脱炭スラグ再利用に向けた熱力学的検討	DOWAホールディングス(株)
田 内 征太郎	製鋼スラグの安定化とアルカリ溶出機構	住友電気工業(株)
橋 本 修 志	包接化合物 $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{33}$ の脱硫剤利用に向けた熱力学的検討	大同特殊鋼(株)
<b>エネルギー応用基礎学分野</b>		
井 上 嵩 人	立方体集合組織 Cu テープを用いた $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 超伝導線材におけるチタン系複合酸化物中間層の化学溶液堆積法による作製条件検討	本田技研工業(株)
出 店 純 弥	薄膜型 $\text{MgB}_2$ 超伝導線材における安定化層と $\text{MgB}_2$ 層間反応防止層の検討	日本電産(株)
野 津 乃 祐	回転変調磁場の最適化による高い2軸配向度を有する $(\text{Y}, \text{Er})\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 超伝導厚膜の作製	日本電産(株)
樋 口 甲太郎	珪素鋼板上に配向制御層と酸素拡散防止層を介して $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ を形成した超伝導線材の研究	日本アイ・ビー・エム(株)
山 口 滉 太	Niめっき {100} <001> 集合組織 Cu テープを用いた $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 超伝導線材用チタン系導電性複合酸化物中間層の組成および作製条件の検討	パナソニック(株)

## ● 博士後期課程修了者

氏 名	研 究 論 文 題 目	就 職 先
<b>物質情報工学分野 (旧 プロセス設計学分野)</b>		
Bolortuya Damdinsuren	Portable X-Ray Fluorescence Spectrometer with High Sensitivity	Nuclear Reserch Center, National University of Mongolia
<b>量子材料学分野</b>		
KUIJPERS Stephan	Phonon wave-packet dynamics at modelled grain boundaries (モデル粒界におけるフォノンの波束ダイナミクス)	
<b>結晶物性工学分野</b>		
陳 正 昊	$\gamma/\gamma'$ 二相 Co 基超合金の合金設計と高温力学特性	京都大学学際融合教育研究 推進センター
仙 石 晃 大	合金化溶融亜鉛めっき銅板を用いたホットスタンプ技術 に関する研究	日本製鉄(株)
<b>構造物性学分野</b>		
Rajeshwar Reddy Eleti	Deformation Mechanisms and Microstructure Evolution in HfNbTaTiZr High Entropy Alloy during Thermo- mechanical Processing at Elevated Temperatures	京都大学大学院工学研究科 特定研究員
<b>エネルギー社会工学分野</b>		
Hien-Tien Lin	Sustainable Waste Management in Small Island Commu- nities: the Case Study of Kinmen, Taiwan (離島におけ る持続可能な廃棄物処理システム：台湾金門県のケース スタディ)	
<b>量子エネルギープロセス分野</b>		
カウバラジャク アヌシット (Anusit Kaewprajak)	Improvement of photovoltaic properties of solar cells with organic and inorganic films prepared by meniscus coating technique	National Science and Tech- nology Development Agency (NSTDA)

## ● 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
<b>物質情報工学分野 (旧 プロセス設計学分野)</b>				
Bolortuya Damdinsuren	Portable X-Ray Fluorescence Spectrometer with High Sensitivity	河 合 潤	平成31年 3 月25日	
<b>量子材料学分野</b>				
KUIJPERS Stephan	Phonon wave-packet dynamics at modelled grain boundaries (モデル粒界におけるフォノンの波束ダイナミクス)	田 中 功	平成30年 9 月25日	
<b>結晶物性工学分野</b>				
陳 正 昊	$\gamma/\gamma'$ 二相 Co 基超合金の合金設計と高温力学特性	乾 晴 行	平成31年 3 月25日	
仙 石 晃 大	合金化溶融亜鉛めっき鋼板を用いたホットスタンプ技術に関する研究	乾 晴 行	平成31年 3 月25日	
<b>構造物性学分野</b>				
Rajeshwar Reddy Eleti	Deformation Mechanisms and Microstructure Evolution in HfNbTaTiZr High Entropy Alloy during Thermo-mechanical Processing at Elevated Temperatures (HfNbTaTiZr ハイエントロピー合金の高温加工熱処理における変形機構と組織形成)	辻 伸 泰	平成30年 3 月25日	
<b>エネルギー社会工学分野</b>				
Hien-Tien Lin	Sustainable Waste Management in Small Island Communities: the Case Study of Kinmen, Taiwan (離島における持続可能な廃棄物処理システム: 台湾金門県のケーススタディ)	石 原 慶 一	平成31年 3 月26日	
<b>量子エネルギープロセス分野</b>				
カウバラジャク アヌシット (Anusit Kaewprajak)	Improvement of photovoltaic properties of solar cells with organic and inorganic films prepared by meniscus coating technique	佐 川 尚	平成31年 3 月25日	
<b>材料プロセス科学分野</b>				
石 田 幸 平	製鋼用連続鋳造鋳型における表面処理技術に関する研究	平 藤 哲 司	平成31年 1 月23日	

## ● 博士学位授与者 論文博士

氏 名	研究論文題目	主 査	取得年月日	備 考
<b>エネルギー応用基礎学分野</b>				
山 田 雄 一	臨界電流のひずみ依存性が強い超電導線材の実用化に関する研究	土 井 俊 哉	平成30年 9 月25日	京都大学工学部冶金学科卒業 昭和60年 3 月 (住友電気工業)

## 会 則

改訂（2018年6月2日）

## 【名 称】

第1条 本会を水曜会と名付ける。

## 【目 的】

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

## 【会 員】

第3条 会員を分けて正会員と学生会員とする。

第4条 正会員は以下の各項のいずれかに該当する者とする。

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

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

## 【役 員】

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

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

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

## 【総 会】

第8条 総会は毎年1回開催する。

## 【役 員 会】

第9条 役員は、役員会を構成し、本会の重要事項の審議を行う。

## 【事 業】

第10条 本会は会誌「水曜会誌」および「水曜会名簿」を発行する。

第11条 本会はその他本会の目的を達成するために必要な事業を行う。

## 【経 費】

第12条 本会の経費は別途に定める会費、寄付金その他の収入により支弁する。

**【会則変更】**

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

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

**【付 則】**

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

水曜会講座等一覧（その1：旧学科，旧専攻等） 2001年現在

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

水曜会講座等一覧 2017年現在

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

**水曜会会費細則**

(2017年9月29日改正)

1. 正会員は、年間3,000円の会費を納入する。

## 水曜会誌投稿規定 (平成25年10月31日改訂)

### 1. 投稿要領

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

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

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

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

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

### 2. 原稿の書き方

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

例:

- 1) 大塚一雄, 宮城 宏: 日鉱誌, **87**, [100], 521-525, (1971).
- 2) M.R. Taylor, R.S. Fidler and R. W Smith: Metallurgical Trans., AIME., **2**, [7], 1793-1798, (1971).

以上

水曜会誌卒業年次幹事制について

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

水曜会年次幹事に関する付則

(目 的)

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

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

(定 員)

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

(任 期)

第3条 任期は2年とし、重任は妨げないものとする。

(委 嘱)

第4条 年次幹事の選任は、同年次会員の推薦により会長が委嘱するものとする。

この付則は平成15年6月14日より施行する。

逝 去 会 員

水曜会誌25巻1号を発行してからご逝去の連絡を受けた方々です。  
謹んでご冥福をお祈り申し上げます。

平成30年9月12日	田中 功	昭和29・冶金
平成30年11月10日	兵頭 経義	昭和29・鉱山
平成30年5月16日	岡田 武彦	昭和40・資源
平成29年4月	鶴岡 泰生	昭和32・鉱山
平成30年11月4日	加藤 勇	昭和45・金属
平成30年11月13日	河野 紘	昭和22・鉱山
平成30年春	大森 滋	昭和26・鉱山
平成30年12月8日	高嶋 修嗣	昭和43・金属
平成30年11月13日	伊藤 二郎	昭和34・鉱山
平成31年2月4日	栗山 隆勝	昭和30・鉱山
平成29年	藤本 良一	昭和54・金属
平成30年8月26日	安達 幸夫	昭和22・鉱山
平成30年11月20日	梅原 喜男	昭和23・鉱山
平成30年3月31日	浅田 幸吉	昭和16(3月)
平成31年1月14日	松永 亮	昭和26・鉱山
平成31年4月4日	泉 泰通	昭和29・冶金
平成31年2月18日	松岡 英夫	昭和29・冶金
平成31年1月27日	河野 一清	昭和29・冶金
平成29年1月6日	萩森 健治	昭和31・冶金
平成30年	國井 信夫	昭和31・冶金
平成30年7月11日	木下 舜	昭和40・資源
平成26年4月16日	那須 三郎	昭和40・金属
平成31年3月	廣澤 克	昭和43・資源
平成29年6月	安藤 俊明	昭和43・金属
平成30年6月8日	木村 治男	昭和53・資源
平成30年6月10日	田中 潤司	昭和56・資源
令和元年5月21日	蒔田 敏昭	昭和28・鉱山
令和元年7月2日	中尾 善信	昭和15 元教官
平成31年1月7日	松田 文憲	
令和元年8月29日	村上陽太郎	昭和17・冶金
平成31年12月	前田 孝	昭和28・鉱山

教 室 報 告

教員人事

<旧資源系>

平成30年11月1日	藤本 仁	教授に昇任
平成30年12月31日	直井 誠	助教 京都大学防災研究所地震予知研究センター(助教)に転出
平成31年1月1日	石塚 師也	助教に採用
平成31年3月31日	石田 毅	教授 定年退職
平成31年3月31日	後藤 忠徳	准教授 兵庫県立大学大学院生命理学研究科(教授)に転出
平成31年4月1日	福山 英一	教授に採用
令和元年5月31日	榊 利博	教授 退職
令和元年7月1日	徐 世博	助教に採用

<旧金属系>

平成31年3月1日	高 斯	講師に採用
平成31年3月31日	堀井 滋	准教授 京都学園大学ナガモリアクチュエータ研究所(教授)に転出
平成31年4月1日	柏谷 悦章	准教授 エネルギー応用科学専攻内配置換えにより入会
平成31年4月1日	鳴海 大翔	助教に採用
平成31年4月30日	豊田 智史	助教 東北大学金属材料研究所(准教授)に転出
令和元年8月31日	韓 東麟	准教授 蘇州大学(教授)に転出

## 水曜会誌の原稿募集について

### 水曜会誌編集委員会

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

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

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

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

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

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

平成 31 年 度 水 曜 会 誌 編 集 委 員

委 員 長 小 池 克 明  
幹 事 楠 田 啓(会誌) 柴 田 曉 伸(広告・HP担当)  
編集委員(学内) 邑 瀬 邦 明 豊 浦 和 明 林 為 人  
編集委員(学外) 森 下 浩 平 松 井 雅 樹 佐 野 光  
中 上 晋 志 藤 村 隆 志

令和元年10月25日 印刷 令和元年10月31日 発行

編 集 兼  
発 行 者  
印 刷 者

宅 田 裕 彦  
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

<b>Retirement Memorial Lectures</b>	
Memories of Rock Mechanics Research for 39 Years .....	Tsuyoshi ISHIDA ..... 87
<b>Memorial Lecture in the Annual Meeting of Suiyokwai</b>	
The Development of Fuel Cell Vehicle and Challenge for Achieving Hydrogen Energy Society .....	Yoshikazu TANAKA ..... 101
Steel Research is Always Interesting: Microstructure; Martensite; Metal fatigue .....	Kaneaki TSUZAKI ..... 107
<b>Forum</b>	
Observation, Theory and Experiments .....	Eiichi FUKUYAMA ..... 113
Toward Understanding Crustal Dynamics Related to Earth Resources: Approaches Based on Earth Observation Data .....	Kazuya ISHITSUKA ..... 118
Interface Growth of SiC in High-temperature Alloy Solution During Solution Growth of SiC .....	Taka NARUMI ..... 124
<b>Current Studies in Laboratories</b> .....	132
<b>Suiyokwai Information</b> .....	161
<b>Letter to Editor</b> .....	177
<b>Regulations</b> .....	192