郵政省告示　第159号
昭和42年２月28日　学術刊行物指定

ISSN 0371-408X

水曜會誌

第 24 巻　第 10 号

目　　次

退職記念講演
私の41年間の仕事 ……朝倉　俊弘 …· 1127
見果てぬ夢 ……酒井　明 …· 1138

大会記念講演
三菱マテリアルの資源事業戦略 ……小野　直樹 …· 1143
環境調和社会の実現を目指す製鉄技術開発
－見える化によるイノベーション－ ……上島　良之 …· 1160
自動車用鋼板を取り巻く環境変化と研究課題 ……長滝　康伸 …· 1173

談　話　室
2014年４月から2016年３月までの鳥取大学での活動 ……奈良　禎太 …· 1177
蛍光X線スペクトル強度に影響を及ぼす因子の検討：
合金中微量元素分析の高精度化を目指して ……田中　亮平 …· 1182

研究速報 …· 1188

会　　報 …· 1213

卒業者名簿 …· 1230

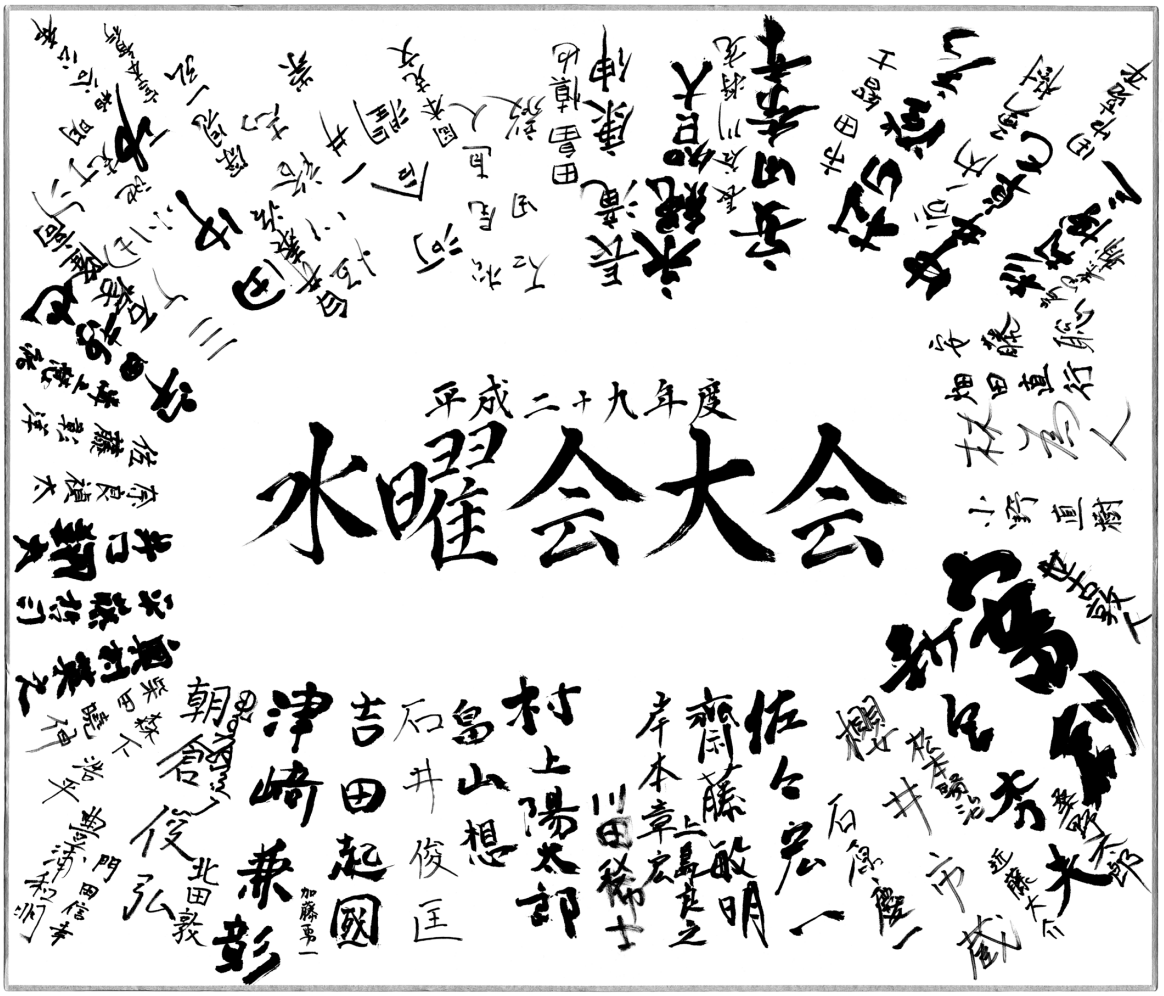
会　　則 …· 1246

平成 29 年 10 月 31 日 発行

京　都　大　学

水　曜　会

平成29年度　水曜会大会　記念写真（平成29年６月３日　京都大学　工学部物理系校舎にて）



平成29年度　水曜会大会　懇親会寄せ書

退職記念講演

私の41年間の仕事

朝　倉　俊　弘*

My Forty One Year's Study

by Toshihiro ASAKURA

1. は じ め に

本稿は，本年４月16日に行われた退職記念講演の内容を原稿化したものである．同講演では，昭和51年（1976年）に京都大学大学院修士課程修了後，日本国有鉄道（以下，国鉄）に就職して以来，平成11年（1999年）京都大学に転職し，さらに定年退職するまでの41年間に筆者が携わった多くの仕事のうち，主なものを俯瞰的に振り返った．紙数の関係から，本稿ではさらに講演内容を絞って記録に留めることとしたい．

2. 学 生 時 代

亡くなった両親から，「戦争直後は何もなく苦労した．朝鮮戦争（昭和25－28年，1950－53年）のおかげで景気が良くなり，ようやくまともな生活が出来るようになった頃，お前は生まれた．従って，大変恵まれている．」とよく言われたものである．戦後日本の高度成長期（昭和30－48年，1955－73年）は，私の学生時代（小学校～大学）にほぼ重なる．中学に進学した昭和39年（1964年）には，アジアで初めてのオリンピックが東京で開催され，新幹線や高速道路が開通した．また，大学に進学した昭和45年（1970年）には，アジアで初めての万国博覧会が大阪で開催された．まさに自身の成長期が，日本の成長期に重なるわけである．

大学時代は，大学紛争の影響で，試験のたびにストがあり，その所為にするつもりは毛頭ないが，基礎的な勉強が不十分であった．その結果，その後40年以上にわたって苦労し，後悔するところとなった．

４年生になって探査工学研究室の配属となり，アナログシミュレータなる抵抗回路を用いて一様電界における感度分析の研究[1),2)]を行った．回路を構成する抵抗素子の精度が不揃いで，とにかくプラグの汚れを磨いてはテスターで抵抗値を確認するという日々であった．指導教官である吉住永三郎教授，菅野強助手の思惑は，当時建設中であった青函トンネルにおける先進導坑からの水平ボーリングを利用して本坑の前方探査を行うことにあったと推察するが，不出来な学生はそれを達成することが出来なかった．

修士２年の初夏に，吉住教授から「鉄道技術研究所（以下，鉄道技研）では，トンネルのための地質調査手法として，弾性波探査に加えて電気探査を行いたいので専門家を求めている．是非行きなさい．」と勧められ，入社試験に臨んだ．無事，合格し，実習を経て鉄道技研に配属となったが，その時の人事的事情からトンネルの建設・保守を担当する吉川恵也主任研究員の補助を行うことになり，結局，以降は電気探査に関する仕事はほとんどなく，トンネル工学が中心の仕事となった．

3. 研 究 業 務

3.1 トンネル掘削による地山挙動

鉄道技研で研究生活を始める前にトンネル建設の現場を経験しておくのがよかろうとのことで，昭和53年（1978年）岐阜工事局長野工事事務所明科工事区に配属された．そこでは当時ヨーロッパから導入されて間もない NATM（New Austrian Tunneling Method）を本格採用した第１白坂トンネルの担当となった[3)]．NATM の最大の特徴は，観察・計測によって地山挙動を把握し，地山の支保能力を最大限に活かす，との触れ込みであったが，具体的な反映の手法は本場ヨーロッパでも一部のコンサルタントのノウハウとして公開されておらず，結局，暗中模索での施工管理となった．試行

*京都大学　名誉教授

錯誤の結果，土被りと最終変位量に一定の関係があることと，初期の変位速度と最終変位量に正の相関関係があることを見出し，管理の基本としたが，これを契機に，以降，トンネル掘削による地山挙動の解明に取り組むこととなった．ちなみに，この経験は，技術士試験（建設部門，トンネル）の経験問題の題材として活かすことができた．

昭和54年（1979年）に鉄道技研地質研究室に異動した．当時の中心業務は，後述する東海地震対策としてのトンネル耐震補強計画の策定[4]と，NATM 設計・施工指針（案）[5]の制定であった．後者は国鉄の建設陣営と日本鉄道建設公団（以下，鉄道公団）が総力を挙げて取り組んだ重要課題であった．中でも計測編は原案作成から会議の運営まで任され，大変忙しい日々ではあったがやりがいがあり，充実していた．特に変位測定結果を切羽設計に役立てる方法を確立することが急務であった．過去に地質研究室の先輩が作製した初期変位計を改良し，いろんなタイプの地質条件のトンネルで掘削直後の切羽近傍の微細な変位挙動を直接計測した．10分程度とはいえ，トンネルの作業を中断してもらい，計測するのであるが，建設会社の作業員の急かす視線を背に感じながら必死の作業であった．結果的に硬岩・軟岩・土砂といった地質条件により差はあるものの，地質の良し悪しに応じて，すなわち最終変位量あるいは切羽の自立性に応じて，掘削直後の切羽面の押し出し速度が変化する（概ね 10^{-1}～10^{-3}mm/min 程度）ことが分かった[6]．（写真 1 参照）

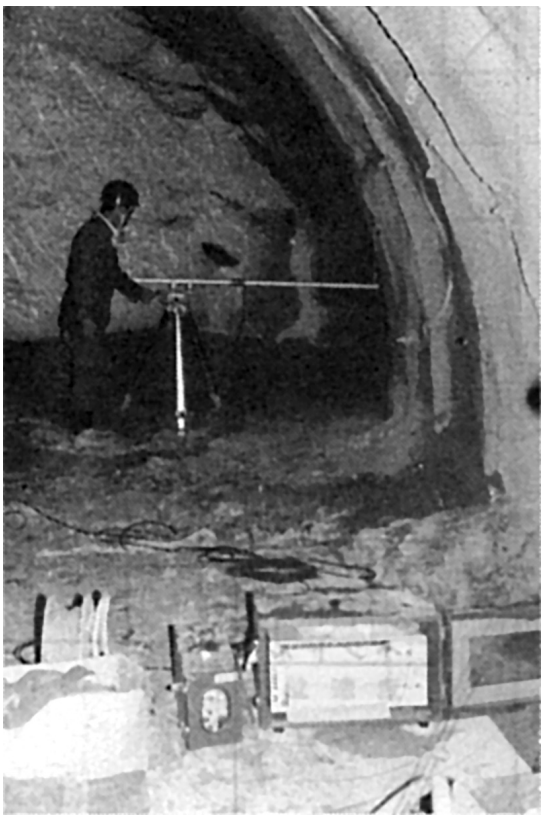


写真 1　初期変位計による計測

さらに，トンネルの掘削変位が時間に依存しない弾性成分と時間依存成分に分離できるはずと考え，掘削のタイミング毎に密に内空変位測定を行うことも試みた．これも現場の担当者にとっては規定外の作業であるため，大変迷惑をかけながら，また申し訳なく思いながらのデータ収集であった．結果として，掘削後直ぐに初期値を取り，次の掘削によってどれだけ変位が生じるかを把握することが重要であり，必要なことが分かった[7]．

このような現場計測，データ分析によって現象解明を試みる研究は，地質状況と掘削による変位挙動の関係を把握できたことだけでなく，現場の作業の流れを十分に体感出来て非常に役に立った．

3.2　トンネル覆工の力学挙動解析

昭和62年（1987年）に国鉄は民営分割され，鉄道技研は財団法人鉄道総合技術研究所（以下，鉄道総研）として再出発した．新しく発足した JR 各社から拠出される負担金によって運営されるため，研究テーマも建設関係から保守関係にシフトすることとなった．国鉄の建設陣営は鉄道公団に吸収され，JR 各社ではトンネルの建設工事を行うことがほとんどなくなったためである．

トンネルの保守に関しては，多様な知識と経験を要する分野であるため，それまでは鉄道技研の専門家が現地局からの支援要請に応じて変状トンネルの調査・診断・対策の指導に当たっていた．ただし，いくつかの問題があり，専門家の絶対数が足りず，また技術的な指導が専門家の経験的知識に強く依存して十分に客観化，定量化されていない状況にあった．そこで，専門家の経験的知識を事例に基づくマニュアルにまとめることにとりかかった．また，トンネル覆工の変状現象を力学モデルにより取り扱えるよう，模型実験を行うことにした．これによりトンネルに作用する地圧を定量的に取り扱えることが可能となり，変状対策工の設計が現場の担当者にも可能となる．

模型実験装置は，いくつかの先行研究がかなり大掛かりなものを採用していたのに対し，多くの実験が行えるよう，小型の装置（縮尺 1/30）を設計し，さらに地盤と覆工の相互作用が可能なように地盤反力ばね（工場などで防振用に使われる硬質ゴムと鋼製の皿ばねを採用）を導入した．数年にわたって百数十体のモ

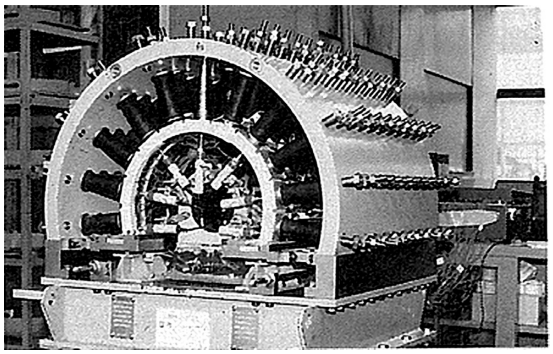


写真２　小型覆工模型実験装置

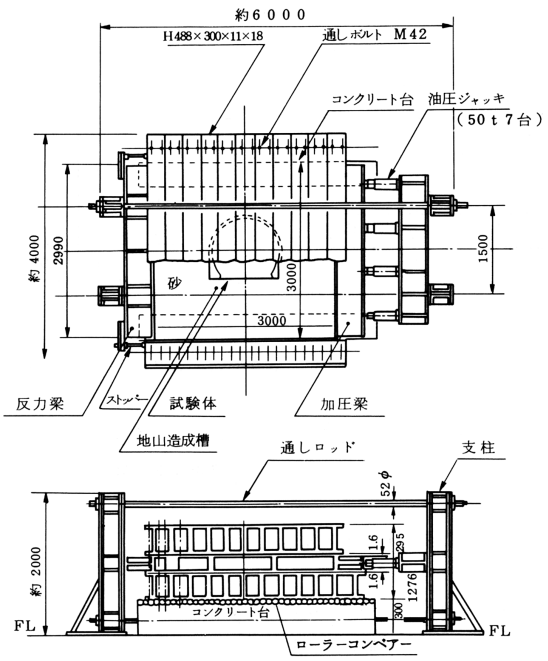


図１　1/10トンネル覆工実験装置

デルの二次元・三次元載荷実験を実施した．（写真２参照）これにより，地圧規模と覆工の変形，破壊現象の関係，背面空洞の構造欠陥としての影響，裏込注入や内面補強工の効果等が定量的に理解できるようになった．さらに，梁ばねモデルを用いた骨組み解析によるシミュレーションを行うことによって，地圧による変状と対策工の効果が解析的に取り扱えるようになった[8),9)]．

その後，変状トンネルの対策工設計の際に，現場の担当者から，対策工を施工した場合の効果を，測定できない（実感できない）覆工の耐荷力ではなく，測定可能な（延命）時間効果で示せないかとの要求が寄せられるようになり，地山強度劣化モデルを用いて時間軸上で対策工効果を示せるようにした．トンネル周辺地山の強度が時間経過とともに低下することにより変状が進行したものと仮定し，変状が顕在化してから対策工施工までの内空変位の変化をもとに，強度低下進行をフィッティングするという手法である．数トンネルでの地質調査，岩石試験と試計算によりそれなりの妥当性を検証している．本手法により，変状トンネルの耐荷力がどれくらい向上するか，だけでなく，どれくらい寿命が延びるか，を目安として示せるようになった[10),11)]．

3.3　トンネルの地震被害メカニズムと対策工

鉄道技研に配属になって最初の仕事が，その発生が懸念されていた東海地震対策であった．既に，前述の吉川主任研究員が地震防災強化地域内の東海道新幹線トンネルを対象として，健全度評価，要対策区間の抽出，耐震補強対策工法の選定等に取り組んでおられた[12)]．赴任して直ぐに1/10スケールの模型実験（図１参照）による耐震補強法の検討を担当した．毎年予算配布が遅く，寒風吹きすさぶ露天の実験場でかじかむ手を擦りながら実験に励んだ日々が懐かしく思い出される．

結局，地質不良箇所，浅い土被り区間に対して裏込注入，ロックボルトを施工することになり，耐震補強マニュアルを作成したり，東海道新幹線興津トンネルにおいてロックボルトの試験施工を行ったり，と忙しい日々を送った．

その後，後述するように，地震によるトンネル被害が生じるたびに現地調査に出かけ，被害メカニズムの想定，復旧対策の検討等を行ったが，中でも1995年兵庫県南部地震における山陽新幹線六甲トンネルの被害を見た時には大変なショックを覚えた．約１日かけて16 kmのトンネルを踏査し，その夜のうちに徹夜で被害状況を被害のパターン別に整理し，そのメカニズムと基本的な復旧対策工の方針をまとめ，JR西日本に提出した[13)]．このことが，その後のトンネルの地震被害メカニズムと対策法の研究のモチベーションとなった．

前述の吉川氏の研究成果をもとに，さらに六甲トンネルで見られた被害のメカニズムの検討を行った．それまでいろんな変状トンネル調査で見てきた被害とも，あるいは，模型実験により把握されていた静的な載荷条件での被害とも，パターンも程度も異なっており，結局，断層破砕帯等の地質不良箇所で強いせん断変形を受けた結果生じた被害であろうという結論を得た．ひどい被害は建設時に膨圧や集中湧水により難工した区間に集中しており，せん断波の位相によってクラウン部に圧座（曲げ圧縮破壊）が生じたり，アーチに軸力によるせん断破壊が生じたり，側壁部に圧縮破

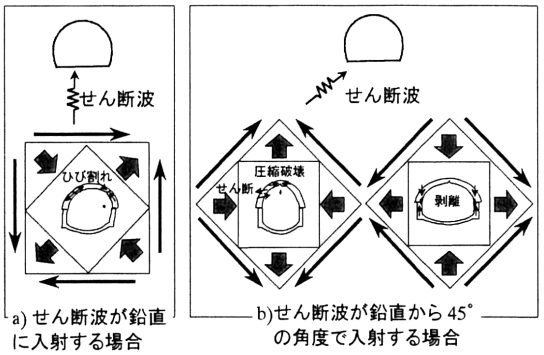


図2 不良地山区間の被害と地震波の入射方向，地震時増分荷重の作用方向の関係[14]

壊が生じたものである（図2参照）．ひび割れ進展を考慮した有限要素解析により再現を試みたが，なかなか実際の被害を再現することは出来なかった．試行錯誤を経て，恣意的に背面空洞をモデル化し，さらに地震荷重に加えて静的な荷重（すなわち地震以前から受けていた地圧）を付加することでようやく実際の被害を再現することが出来た[14]．

4. 研究プロジェクト

4.1 走行式トンネルコンクリート点検システム

競争的研究資金の獲得には甚だ不熱心であったが，時勢に乗じて二度ばかり大型の研究資金を獲得する幸運に恵まれたこともある．一つは，「運輸分野における基礎的研究」平成12－13年（2000－01年）で，後述する山陽新幹線覆工剥落事故を受けて，効率よく覆工点検を行うための研究プロジェクトで，総括代表研究者として東京大学・東京工業大学・竹中技術研究所の協力を得て研究を進めた[15]．

4.2 山岳トンネルの地震被害メカニズムと耐震性向上に関する研究

二つ目は同じく「運輸分野における基礎的研究」平成18－20年（2006－08年）で，これは後述する2005年新潟県中越地震による上越新幹線魚沼トンネル他の被害を受けてのもので，やはり総括代表研究者として鉄道総研及び鉄道建設・運輸施設整備支援機構（以下，鉄道・運輸機構）の協力を得て研究を進めた[16]．

5. 基 準 類 整 備

5.1 トンネル設計関係

鉄道総研の重要な役割の一つに，運輸省（現国土交通省）の依頼により，鉄道事業者（JR，民鉄，地下鉄）のための各種基準類を整備する業務がある．コンクリート，基礎・土構造，鋼構造，等とともにトンネルについても同様で世の技術の趨勢に合わせ鉄道構造物設計標準，維持管理標準等を制定，あるいは改訂するものである．

また，国の定める標準類と違い，拘束力はないけれども各鉄道事業者の業務に資するために様々なレベルの手引き書やマニュアル類を作成するのである．筆者の携わったものには以下のようなものがある．

1）NATM 設計施工指針（案）[5]

筆者が鉄道技研に異動した当時は，トンネル建設工法が鋼製支保工と木矢板による，いわゆる矢板工法から，吹付けコンクリートやロックボルト，鋼製支保工を主要支保部材とする NATM への移行期間にあり，当面の設計施工指針が必要との認識から，国鉄建設陣営と鉄道公団が総力を挙げて取り組んだものである．筆者は，前述の吉川氏が主担当であった設計編の NATM のための地山分類基準とそれに対応する標準支保パターン作成業務と計測編を主担当として原案作成業務を担当した．前者については，数十トンネルの調査・設計・施工・計測データを個々に分析しつつ，相関図，頻度図等に加工しながら統計的に評価して数値を定めていくもので，大変な作業であった．後者については，外国の事例を参照しながら原案を作成した[17]．検討会議の2，3日前から徹夜で資料作りに励むのが常であった．

2）設計標準（都市部山岳工法編）[18]

国土交通省の依頼に基づき設計標準の原案を作成するもので，部外識者に委嘱する委員会で議論し，作成した．委員長の足立紀尚京都大学教授（当時）から，補助工法という用語はよくないので代案を考えるよう指示され，悩んだ挙句に施工条件に応じて特殊工法，対策工という用語に置き換えることにした．鉄道総研では以降，鉄道構造物等維持管理標準・同解説[19]等の基準整備をしている．

5.2 トンネル保守関係

1）トンネルのロックボルトによる耐震補強工設計指針（案）[20]

前述の東海地震対策の一環として行った東海道新幹線興津トンネルにおけるロックボルトの試験施工結果をもとに，部内基準用に作成したもので，裏込注入とロックボルト工によるトンネル補強法の原型といえるものである．

2）トンネル補強補修マニュアル[21]

トンネル変状診断は豊富な経験と多様な知識を要するため，高度な技術分野といえる．従ってこの分野の現場技術者支援の目的で作成したマニュアルである．調査・診断の基本を具体的に示した共通編，地質的要因により地圧等の外力を受けたトンネルを対象とした

地圧対策編，経年や環境要因から覆工が劣化したトンネルを対象とした劣化覆工対策編，漏水や寒冷地における凍害を受けたトンネルを対象とした漏水・凍害対策編よりなる．それぞれ，細分化された変状原因別に具体的な変状事例と実際に適用された対策事例を示したものである．

3）既設トンネル近接施工対策マニュアル[22)]

都市内及び都市近郊の土地の高度利用化に伴い増加する既設トンネルへの近接工事に対する対応の基本を示したマニュアルである．既設トンネル上部の盛土・切土・構造物の施工，既設トンネル側方の切土，既設トンネル直上・直下のトンネル交差，発破振動等の各種の近接工事ごとに制限範囲，要注意範囲等の離隔を定義し，必要な調査・監視計測・（必要な場合の）対策工について示した．離隔の標準的な値は，過去の近接工事の実績分析と数値解析により検討した結果に基づき定めている．

4）変状トンネル対策工設計マニュアル[23)]

前述のトンネル補強補修マニュアルは，経験の浅い現場技術者にも一定レベルの判断を可能にするもので，大変重宝されているが，いざ実際に変状対策工の設計を行おうとすると，具体的な対策区間の設定，対策工の諸元等が決め難く，結局専門家の指導を仰がざるを得なくなるとの意見が寄せられ，これに対応するために，地圧を受けて変状したトンネルの変状の進行に応じた具体的な対策工のメニューを示したもので，その根拠材料として，過去の変状対策工の事例分析，前述の模型実験結果，数値解析結果等を活用し，判断した．これにより，現場において独力である程度まで変状対策工設計を行うことが可能になった．

6. 学 協 会 活 動

6.1　土木学会トンネル工学委員会

トンネル工学委員会では多様な活動を行ってきた．平成21－22年度（2009－10年度）には委員長も務めた．その主たる作業は，約十年おきに改訂されるトンネル標準示方書（山岳編）の執筆･編集作業である．また，その英語版[24)]の執筆・編集作業も主査として担当したが，これは販売実績が上がらず，学会の代表的（販売実績）不良図書の烙印を押されている．苦労の割に報われなかった仕事の代表でもある．

昭和62年（1987年）に出版されたトンネル用語辞典[25)]（委員長：山本稔東京都立大教授（当時））もその編集作業で大変苦労をした．年末に脱稿し，やれやれと思ったのも束の間，学会担当者が最終原稿を大掃除のゴミと一緒に出してしまい，今と違って電子データなど残っておらず，執筆者や編集者の最新の手持ち原稿を掻き集めた．少し古い原稿しか見つからないのもあったが，諦めて妥協し，出版にこぎつけたものである．学会担当者は夢の島まで探しに出かけたそうであるが，見つからなかったとのこと．まあ当然であろう．26年を経て改訂版[26)]を出そうということになり，今度は委員長を引き受けたが，CD-R による出版としたことが災いしたか，よく売れた第１版に比べ，甚だ売れ行きが悪かった．紙ベースの方がよかったのでは？といまだに悔やまれる．

トンネル工学委員会には技術小委員会があり，その中で標準示方書に書き込む程度には技術が確立しておらず，標準化できるレベルにないものについて，時機に応じテーマを設定し，部会を立ち上げて書籍にまとめ「トンネルライブラリー」シリーズとして出版している．そのうち，「山岳トンネルの立坑と斜坑」[27)]，「トンネルの維持管理」[28)]等は部会長として執筆・編集に当たった．

また，トンネルが被害を受けるような地震が起きると，調査団を結成して被害調査を行ったり，特別小委員会を組織して被害実態を取りまとめてきている．

2005年新潟県中越地震[29)]，2007年新潟県中越沖地震[30)]，2011年東北地方太平洋沖地震[31)]等の調査報告書はトンネル工学委員会のホームページから閲覧できるようになっている．

6.2　土木学会岩盤力学員会

岩盤力学委員会との関わりも古い．昭和54年（1979年）に鉄道技研に異動して直ぐに第２分科会（トンネル分科会）の委員に就任し，10年以上にわたって幹事役を務めた．また，平成12年（2000年）には臨時に「トンネル変状小委員会」を立ち上げ，その活動成果を平成15年（2003年）に「トンネルの変状メカニズム」[32)]として取りまとめた．この時の委員会メンバーから，委員会を解散するのに忍びない，研究活動を継続してほしいとの要請が多く寄せられ，「トンネル変状研究会」なる任意のグループを結成した．このグループの活動はその後長く続き，筆者の退職に合わせて結成された「特定非営利活動法人（NPO 法人）トンネル工学研究会」に受け継がれている．

岩盤力学委員会におけるその他の活動の中では，原子力発電廃棄物処理用の地下施設の耐震性を検討する「大深度地下構造物の耐震性評価に関する研究小委員会」（平成23－25年度，2011－13年度），石油地下備蓄基地におけるサービストンネル等の維持管理と岩盤タンクの安定性評価のための「岩盤タンク等地下構造物の維持管理技術に関する調査検討委員会シングルシェルトンネル維持管理技術検討小委員会」（平成26－28年度，2014－16年度）等が記憶に残っている．筆者の

仕事の大半は土木的トンネル工学関連であるが，これらは貴重な数少ないエネルギー関係の仕事であった．

6.3 その他の学協会活動

トンネル工学は学際的な知識と経験を要する分野であるため，上記の土木学会以外にも多くの学協会に所属し，活動する必要があった．土木学会の他，応用地質学会（編集委員会委員），物理探査学会（土木分野への電気探査適用検討委員会委員），資源素材学会（理事・関西支部長），材料学会（理事・企画委員長，岩石力学部門委員長），岩の力学連合会（副理事長），ISRM（国際岩の力学会），鉄道施設協会，鉄道技術協会，トンネル技術協会（200本以上のトンネル技術委員会委員長，委員）等に所属し，種々の活動を行ってきた．また，道路協会，高速道路技術センター等の道路関係の技術委員会でも委員として活動してきた．

これらの活動の大半は，ボランティアワークであり，本業が多忙な時はかなりの負担であったが，思い返すと，忙しい時ほどいろんな仕事が舞い込んできたような気がする．実は，退職後の今もそうである．しかし，反面，多様な分野の専門家と交流でき，勉強になったし，人的ネットワークが広がったというメリットも大きかったと思う．

7. 事故・災害調査

7.1 地震被害調査

1995年兵庫県南部地震，2005年新潟県中越地震，2007年新潟県中越沖地震，2011年東北地方太平洋沖地震等についてはトンネルが少なからず被害を受け，要請を受けて被害調査，復旧対策の技術指導を行った．

特に印象に残っているのは1995年兵庫県南部地震における山陽新幹線六甲トンネルの被害調査で，初めて本格的な？トンネルの地震被害を目の当たりにして，その後のトンネル地震被害に関する研究のきっかけとなった．筆者の実家も神戸にあり，幸い人的被害はなかったものの家屋は半壊の認定を受ける被害であり，六甲トンネルには何度も足を運ぶものの，実家にはなかなか行けずヤキモキしたものである．六甲トンネルの被害の大きい箇所は十数か所あり，アーチクラウン部のせん断破壊，曲げ圧縮破壊，側壁迫め部の圧縮破壊等が生じていた．（写真３参照）前述したように試行錯誤による数値解析で再現シミュレーションを行ったが，具体的な復旧対策には裏込注入，ロックボルトに加えて当時研究中であった炭素繊維シートを内面補強材として採用した．被災箇所の覆工の補強のため，内空余裕を侵さぬよう繊維シートの採用を提案したのであるが，その後列車運行再開のための試運転時に，炭素繊維の切り屑を原因とする車両のモーター故障や

（a）アーチクラウン部のせん断破壊，曲げ圧縮破壊

（b）側壁迫め部の圧縮破壊

写真３ 1995年兵庫県南部地震における六甲トンネルの被害

ら，シート端部とき電線との間で地絡現象が生じ，大いにJR西日本に対して迷惑をかけることとなった．以来，反省して電化断面トンネルでは導電体である炭素繊維は使わないようになった．ちなみに，兵庫県南部地震が起きた時期は，筆者にとって博士論文の仕上げ時期であったが，復旧対策等に忙殺され，約１年間完成が遅れてしまった．指導して頂いた佐々宏一教授からは，トンネルの地震対策について１章追加するように指示され，結果として論文の充実が図れたので結果オーライかなと納得している．

2005年新潟県中越地震では，JR東日本からの要請で，上越新幹線トンネルのトンネル調査を行った．震

写真４　2005年新潟県中越地震における魚沼トンネルの被害

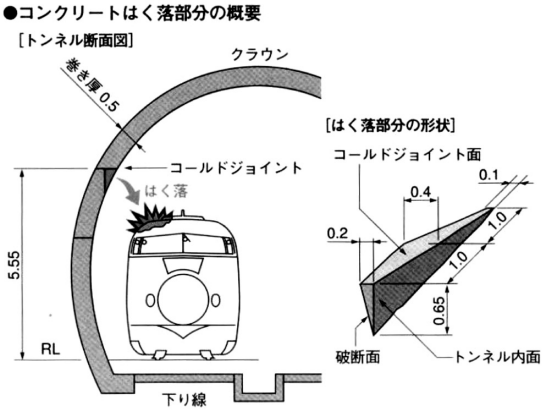


図３　福岡トンネルにおける覆工コンクリート剥落事故

源ほぼ直上の魚沼トンネルでアーチ部覆工が大きく剥落した箇所があり，また部分的な路盤隆起も見られた．（写真４参照）ただし，延長8625ｍの長大トンネルにもかかわらず，甚大な被害はアーチの被害が１箇所，路盤隆起が３箇所のみであり，地震エネルギーの規模，震源距離のみならず，トンネルが位置する箇所の地質の良否と当該箇所の構造条件が悪い条件に重なった時に被害が生じるのだと改めて確信した．これは先の六甲トンネル等の被害事例でも同様であった．このことは，常時の，静的な条件で変状が生じている箇所を丁寧に対策しておくことが，同時に耐震補強にもなることを示していると言える．

以来，地震速報がテレビで流れると，特に震度５以上であると，急な要請に備えて，以降の予定表をチェックしたり，作業服や所持金を確認したりする習慣ができてしまった．

7.2　覆工剥落事故調査[31)]

平成11年（1999年）６月に山陽新幹線福岡トンネルで覆工コンクリートの一部が剥落して走行中の新幹線車両の屋根部を直撃するという事故が起きた．新幹線の安全神話が崩れた，と報道され社会的な問題になった．コンクリート打設の中断によって意図せず生じる不連続面，いわゆるコールドジョイントが剥落の一因であったが，耳慣れない用語が話題になったものである．（図３参照）

同年10月に同じく山陽新幹線北九州トンネルで，逆巻の側壁迫め部の突起部が剥落した．たまたま，鉄道総研から京都大学に籍を移した直後であり，現地調査直後のテレビ取材の放送時に「京都大学朝倉俊弘助教授」と出たので，異動の挨拶状を出すまでもなく広く知れるところとなった．

同年11月にまさかの三つ目の剥落事故が，室蘭本線礼文浜トンネルで起こった．アーチ部で押し抜きせん断破壊により計２tものコンクリートが落下したもので，たまたま先述した実験装置を用いて三次元的な局所載荷実験を行った後であったため，まさか同様の事象が実トンネルで起こるとは，と驚いてしまった．

これら一連の剥落事故によって，新幹線構造物の信頼性を一時失いかけたが，大変幸いなことに人的被害はなく，逆にトンネルのメンテナンスの必要性，重要性が社会的に認知され，トンネル検査の厳密化が図られ，さらに多くの検査手法，検査機器の開発につながったのは，幸甚であったと言えなくもない．

7.3　その他の事故調査

平成15年（2003年）９月に，委員会に参加していた建設中の北陸新幹線飯山トンネル上倉工区でトンネル崩落事故が生じ，地表にまで陥没孔が生じた．土被りの浅いトンネルでなら起こりうるものと思っていたが，なんと190ｍもの土被りで地表陥没が生じたことに衝撃を覚えた．地層が垂直に近くなった時には切羽前方の地質状況，地下水状況を調べながら慎重に掘削する必要があることを痛感した．飯山トンネルでは，その後平成16年（2004年）と平成18年（2006年）にも板倉工区において大規模な崩落事故が起きており，不名誉な記録を作ってしまった．ただし，平成20年度には困難な地質条件を克服したことにより，土木学会技術賞を受賞している．

平成17年（2005年）５月に建設中の東北新幹線牛鍵トンネルで地表面陥没を伴うトンネル崩落事故が起きた．やはり筆者が委員会に参加していたのであるが，現場を見て極めて不謹慎ながらもその陥没孔の形状に美しさを感じてしまった．陥没は，地表部の耕作田に灌水された地下水が地山の緩みの影響もありトンネルに作用して横圧が増大したことによるものとされた．

平成24年（2012年）5月に八箇峠トンネルでガス爆発事故が生じ，4名の犠牲者を出した．ガスの湧出が懸念される地層を避けてルートを変更していたにも関わらず，融雪期に工事再開の準備作業に入坑した時に爆発が生じたもので，筆者も参加した委員会において，入坑前にガス濃度測定を行うなり，換気を行っておくべきであった，と反省された．

他に，守秘義務があり，具体的内容には触れられないが，警察の求めに応じて専門家としての意見書を書いたことが数回ある．自分の見解が人を裁く材料になると考えると，大層緊張するので，今後はあまり引き受けたくないものである．

8. 海外技術協力

8.1 ソウル地下鉄3号線，4号線

昭和58年（1983年年）JARTS（海外鉄道技術協力協会）が韓国のソウル地下鉄3号線，4号線の建設に対するコンサルティング契約を結んだ．稠密な大都市直下でのNATM施工ということで設計，施工，計測管理と工事全般にわたってコンサルティング業務を行った．韓国側の事情で発注者であるSMSC（ソウル地下鉄建設公社）に対してではなく，大宇コンサルタントのサブコンサルタントとしてアドバイスを行った．土屋敬鉄道技研主任研究員を団長とし，筆者は計測管理のスペック作りを担当した．韓国の技術者はプライドが高いためか，作業服を着たがらず，スーツに革靴といったいでたちで現場に出かけ，文化の違いを大いに感じたものである．当時のカウンターパート達とは今でも交流が続いている．

8.2 中国鉄道科学研究院

平成5－7年（1993－95年）今ほどは日中関係が悪くなかったこともあり，日本と中国の鉄道の研究所で共同研究を行うことになり，筆者が担当していたトンネルの耐震性について共同研究を行った．何回か北京の鉄道科学研究院を訪問し，また国立の鉄道総研にも中国の研究者を招いて議論を交わした．当初，中国では地震はほとんどないものと思い込んでいたが，それは情報が入らなかっただけで，実は地震多発国で被害事例も多いのだと分かった．日本では，中国側技術者に和食，洋食，中華といろんな料理を御馳走したが，新幹線で京都を訪れた際に，日本の代表的庶民的中華料理屋だといって珉珉に招待したら，非常に好評で，かつてないほど追加注文がされ，複雑な気持ちになりつつホッとしたことを覚えている．

8.3 台湾北廻鐵道，南廻鐵道改良計画

平成6年（1994年）台湾の某コンサルタントから北廻り鉄道改良の一環として観音トンネル別線付替え計画の策定に対する協力要請があり，何回か訪台し，アドバイスを行った．しかしながら，コンサルタントの経営者夫婦が選挙違反で訴追され，行方知れずとなって鉄道総研に対して契約不履行のまま有耶無耶になってしまった，という笑えぬ結末になってしまった．

写真5 台湾南廻鐵道トンネルの視察

平成26年（2014年）には，台湾の別のコンサルタントから南廻り鉄道の電化のためのトンネル変状対策の技術指導を依頼された．今度は，すでに交流のある技術者からの依頼であったので快諾して訪台した．夜間に台湾の技術者たちと約10トンネルを調査し（写真５参照），鉄道部改良工事局に出向いて，対策についてのリコメンドを行った．ただし，予算事情が厳しいようで，費用のかさむ対策の提案については，皆浮かぬ顔で聞いていた．安全性確保の重要性を力説して帰国したが，その後予算措置が叶ったようで具体的な改良計画が進んでいると聞いている．

8.4　ダム排砂トンネル

近年，台湾では我が国と同様異常なゲリラ豪雨が頻発しており，ダム上流の斜面崩壊によるダム湖の堆砂が深刻な問題となっている．八田與一のダム建設の話で知られているように，台湾南部はもともと水資源に恵まれず，ダムの有効貯水量の減少は農業にとって深刻な問題となっている．そこで，いくつかのダムでダム湖から堆砂を流出させる排砂トンネルが建設されている．取水口はダム湖内での工事となり，吐出口は大断面となって大変難しい工事となるため，いろんな質問が寄せられ，日本国内のダムの専門家にも応援してもらいながら対応した．

8.5　ポルトガル鉄道高速化

平成21年（2009年）ポルトガルにおける鉄道高速化計画に関連して，トンネルのメンテナンスに関するシンポジウムが開催され，ゲストスピーカーとして日本の現状を紹介し，パネル討議に参加した．主催側の教授から夕食に招待されていたのであるが，運輸大臣との約束が急にできたとキャンセルされ，やや憤慨したが，結局，レストランで本場のポートワインを頂きながらファド（ポルトガルの民族歌謡）を聴くという得難い経験をしたので結果よしであった．また，ヨーロッパ最西端といわれるロカ岬に立って西方を臨み，この彼方にアメリカ大陸があるのかと思うと不思議な感覚におそわれたものである．

8.6　伊・仏アルプストンネル

ある商社が，Lyon（イタリア）・Turin（フランス）間のアルプストンネル計画を進めるため，平成７年（1995年）６月に日本の運輸省，鉄道公団，鉄道総研のトンネル技術者による調査団が派遣され，それに加わった．駐伊・駐仏日本大使とも面談し，伊・仏の技術者とともに現地踏査を行い，議論をした．（写真６参照）トンネル屋として大変魅力のあるプロジェクトであるが，残念ながら両国とも財政的な問題が厳しいようで，いまだ実現に至ってはいないようである．

9.　その他の仕事

9.1　炭素繊維シートによるトンネル補強

炭素繊維は宇宙船の船体にも使われているように，高強度・高剛性の材料である．シート状のものをトンネル壁面に貼り付けることにより引張補強材として利

写真６　伊・仏間アルプスにおける現地調査

用しようという目的でメーカー，コンサルタント，大学等と研究会を作り，施工試験や，付着強度試験，貼付したトンネル模型の載荷試験等を行った．この結果はマニュアルにまとめて出版し[33]，現場における施工実績も蓄積されている．

9.2 可塑状注入

3.2で述べたように，トンネル覆工背面の空隙充填は，トンネル補強対策の最も基本的な対策工法であるにも関わらず，あまり研究がなされておらず，また現場における施工も必ずしも満足できるものではなかった．そこで，水に強く，空隙の完全な充填が期待できる可塑状注入の開発に取り組んだ．その後，可塑状注入の必要性が認識され，多くの材料，工法が開発されるに至っている．

9.3 中山隧道

雪深い山古志村の村人が，冬期間の道路を確保するために自分たちで掘りあげた約 1km の手掘りトンネルである．映画「掘るまいか」でその苦労の過程が紹介されている．軟弱な新第三紀の堆積岩中に無普請（ライニングなし）で施工されたため，地質不良箇所ではアーチ部地山の破壊，部分的な崩落，アーチ・側壁の剥離・剥落等が生じており，危険なため道路管理者により通行止めの措置がなされている．バイパスとして新しいトンネルが並行して完成しており，不便があるわけではないが，地元住民の隧道に対する愛着は深く，また貴重な観光資源としての価値もあるため，何とか全通をとの要請が強い．そこで，手掘り感を維持しつつ，安全を確保しながら，どのような対策工を施工するか，アドバイスをしている．

9.4 安全研究所委員会

JR 西日本の安全研究所が開催する安全検討委員会の委員長を平成20－29年（2008-2017年）の10年間務めた．

安全工学におけるヒューマンファクターを中心とする研究が対象であり，どういう経緯でトンネル屋の筆者が委員長を務めることになったのかはつまびらかではないが，分野違いの研究の話を聞くのはそれになりに楽しかった．特に実験に対する考え方，方法論が理系と文系では随分違うのに新鮮な驚きを感じた．

10. お わ り に

トンネル工学は経験工学の最たるものと位置づけられるが，いろんな学問分野知識を要する学際的な分野であるとも言える．振り返ってみて，41年間にトンネル工学に関連していろんな課題に取り組めたことは幸いであった．建設関係の課題にも取り組めたし，保守関係の課題にも取り組むことができた．また，解析的手法，実験的手法，現場計測，データベースによる統計的手法等いろんな手法を駆使して研究に取り組めたことも幸いであったと言える．若い研究者，技術者には，ともすれば狭い分野で限られた手法による研究に陥ってしまわぬようアドバイスとエールを送りたい．新幹線を中心とした多くのトンネルの建設に関する技術委員会を通して経験知を得たことは幸いであったし，さらに多くの変状トンネル調査に携わっていろんなトンネルを見ることができたことも貴重な経験であった．

若い頃には先輩から学び，働き盛りの年頃には自ら熱中して取り組み，年齢を重ねてからは後輩の指導をする，そういった日々の積み重ねであっという間の41年間であった．先輩から学んだ知識を，少しは発展させて後輩達に引き継ぐことができたのではないかと自負している．満足と感謝の気持ちで一杯である．

退職後は，特定非営利活動法人（NPO 法人）トンネル工学研究会の理事長として活動している．これはトンネル工学分野への恩返しの積もりで立ち上げたボランティア活動のための組織である．健康に留意し，元気な限り，微力ながらも恩返しをしたい．

末筆ながら，これまでお世話になった先輩・同輩・後輩の皆様に対し，そのご厚意とご指導・ご鞭撻に深甚の謝意を表したい．有難うございました．

参 考 文 献

1） 朝倉俊弘：一様電界における感度分布の研究，京都大学卒業論文，1974
2） 朝倉俊弘:一様電界における比抵抗分布の研究，京都大学大学院修士論文，1976
3） 朝倉俊弘：篠ノ井線第 1 白坂トンネルの施工，日本トンネル技術協会施工体験発表会，1979
4） 吉川恵也，朝倉俊弘，名倉隆雄：既設トンネルの耐震健全度評価，トンネルと地下，Vol.21, No.2, 1990
5） 日本国有鉄道建設局，新幹線建設局，施設局：NATM 設計施工指針（案），1983
6） 朝倉俊弘，川上義輝，馬場富雄，小野田滋：トンネル切羽付近における変位計測，第 6 回岩の力学国内シンポジウム講演論文集，1984
7） 朝倉俊弘，川上義輝，馬場富雄，小野田滋：トンネル切羽における初期変位測定（第 2 報），鉄道技術研究所速報，1985
8） 朝倉俊弘，小島芳之，安東豊弘，佐藤豊，松浦章夫：トンネル覆工の力学挙動に関する基礎的研究，土木学会論文集，No.493/Ⅲ-27, 1994
9） 朝倉俊弘，安東豊弘，小俣富士夫，若菜和之，松浦章夫：欠陥を有するトンネル覆工の変形挙動と内面補強工の効果，土木学会論文集，No.493/Ⅲ-27, 1994
10） 松長剛，熊坂博夫，小島芳之，朝倉俊弘：地山

強度の経時劣化を考慮したトンネル変状の予測と対策に関する研究，土木学会論文集，No.799, Ⅲ-72, 2005
11）野城一栄，嶋本敬介，小島芳之，高橋幹夫，松長剛，朝倉俊弘：地山劣化モデルによるトンネル変状の再現解析とその長期予測への適用，土木学会論文集 C，Vol.65, No.1, 2009
12）吉川惠也：鉄道トンネルの震災事例調査，鉄道技術研究報告，No.1123, 1979
13）T. Asakura, Y. Sato : Damage to Mountain Tunnels in Hazard Area, Special Issue of Soil and Foundations, Japanese Geotechnical Society, 1996
14）朝倉俊弘，志波由紀夫，松岡茂，大矢敏雄，野城一栄：山岳トンネルの地震被害とそのメカニズム，土木学会論文集，No.659/Ⅲ-52, 2000
15）朝倉俊弘（研究代表者）：走行式トンネルコンクリート点検システム，運輸分野における基礎的研究，2000-2001
16）朝倉俊弘（研究代表者）：山岳トンネルの地震被害メカニズムと耐震性向上に関する研究，運輸分野における基礎的研究，2006-2008
17）吉川惠也，朝倉俊弘：NATM のための設計のパターン化の研究，鉄道技術研究報告，No.1235, 1983
18）国土交通省鉄道局監修，鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説　都市部山岳工法トンネル，2002
19）国土交通省鉄道局監修，鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等維持管理標準･同解説（構造物編）トンネル，2007
20）日本国有鉄道施設局土木課：トンネルのロックボルトによる耐震補強工設計・施工指針（案），1985
21）鉄道総合技術研究所:トンネル補強･補修マニュアル，1990
22）鉄道総合技術研究所：既設トンネル近接施工対策マニュアル，1995
23）鉄道総合技術研究所：変状トンネル対策工設計マニュアル，1998
24）Japan Society of Civil Engineering : Japanese Standard for Mountain Tunneling, 1996 The Fifth Edition, 2000
25）土木学会：トンネル用語辞典，トンネルライブラリー第 3 号，1987
26）土木学会：トンネル用語辞典 2013年版，トンネルライブラリー第26号，2013
27）土木学会：山岳トンネルの立坑と斜坑，トンネルライブラリー第 7 号，1974
28）土木学会：トンネルの維持管理，トンネルライブラリー第14号，2005
29）土木学会：トンネル工学委員会新潟県中越地震特別小委員会報告書，2006
30）土木学会：トンネル工学委員会新潟県中越沖地震特別小委員会報告書，2008
31）土木学会：トンネル工学委員会東北地方太平洋沖地震特別小委員会報告書，2013
32）土木学会：トンネルの変状メカニズム，2003
33）TSC 研究会：FRP によるトンネル覆工剥落対策マニュアル，山海堂，2003

退職記念講演

見果てぬ夢

酒　井　　明*

Impossible Dreams

by Akira SAKAI

1. は じ め に

「いつかは試みてみようという研究の種を常にいくつか持っているように」，とは，功成り名遂げた先輩研究者がよく口にするアドバイスである．この教訓に従って，というよりは自身の本来の夢想癖の故に，昔から種々雑多な研究の種をあれこれ考えてきている．その大部分はとりとめもないもので，実際に手を付けることなく今日に至っているが，退職の講演を行うに当たり，それらの中で比較的「まとも」であると思われる3つのテーマについて,「見果てぬ夢」(impossible dreams) と題してその概要をお話しした．この拙文ではさらにテーマを2つに絞り，その内容と内在する問題点を述べることにする．ただし第2のテーマについては，既に実験例があって夢物語ではないことがその後に判明したため，ここでは略述するにとどめる．どちらの研究テーマも本格的に研究に着手するには至らなかったので，研究の feasibility は詳細に詰めてはいない．大体の要点は押さえたつもりであるが，まだ重要な見落としがあるかも知れない．その点はご寛恕いただきたい．

2. 電界イオン化を用いた偏極 ^{3}He イオンビームの生成

2.1 偏極 ^{3}He について

^{3}He は通常のヘリウムである ^{4}He の安定同位体で，その原子核は2個の陽子と1個の中性子とからなっている．核スピン0の ^{4}He と異なり，^{3}He は核磁気モーメントを有しているが，偏極 ^{3}He はこの核磁気モーメントが特定の方向に向いた ^{3}He のことである[1]．このような核偏極粒子は，高エネルギー物理学の実験でクォークのスピンなどを調べる際に使用され，特に偏極 ^{3}He は生成が困難である偏極中性子の代替として利用される（^{3}He の核磁気モーメントの大部分は中性子が担っている）．また偏極 ^{3}He ビームは，表面磁性の新たなプローブとしても注目されつつある．

^{3}He の核偏極は ^{3}He の電子スピンを偏極させることによって実現される．電子が偏極すると，電子スピンと核スピンの間の超微細相互作用（Fermi の接触相互作用）を通して電子の偏極が核にも伝えられる．従って問題はどのようにして ^{3}He の電子を偏極させるか，ということになるが，通常用いられる手法は円偏光を利用した光ポンピング[2]である．この手法では放電で ^{3}He を 2^3S_1 状態に励起しておき，円偏光を照射して $2^3S_1 \rightarrow 2^3P_0$ の遷移を起こさせる．この遷移には円偏光の選択則が働くが，緩和過程である逆の $2^3P_0 \rightarrow 2^3S_1$ 遷移には選択則がなく，結果として 2^3S_1 状態の偏極度が高まってゆく．さらに 2^3S_1 状態にある ^{3}He が基底状態の ^{3}He と衝突すると，電子状態を入れ替えてしまう過程（metastability exchange）が起きることがあり，この過程を通して 2^3S_1 状態の偏極が基底状態に引き継がれる．こうして基底状態の ^{3}He の電子が偏極し，超微細相互作用により核偏極が実現される．

2.2 電界イオン化

光ポンピング法で偏極 ^{3}He を生成するためにはいくつもの過程を経由しなければならず，必要とする装置も（特殊な装置ではないが）簡単なものとは言い難い．これに対して今回議論する偏極 ^{3}He イオンビームの生成手法は非常に単純で，真空装置以外には，必要なものは ^{3}He ガスと針状エミッタと高圧電源だけである．今回の手法の基本は電界イオン化（field ionization）[3,4]にあるので，先ずこの過程を簡単に紹介しておく．今，正の高電圧が加えられた金属電極の表面に基底状態に

*京都大学　名誉教授

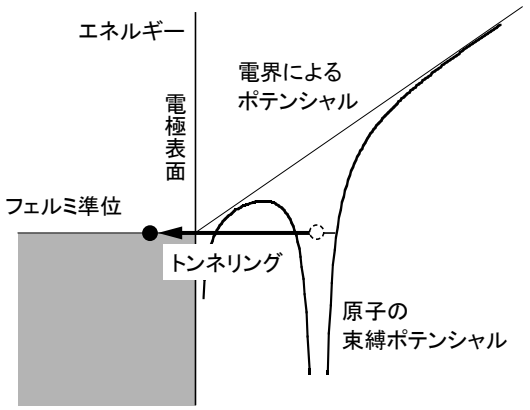


図1　原子の電界イオン化の模式図．高電界の下で原子の最外殻にある電子が電極のフェルミ準位にトンネルして原子がイオン化する．

ある原子が近づいた場合を考える．この時に電子が感じるエネルギーは図1のようになる．図の左半分は金属電極の伝導帯で，フェルミ準位まで電子が占有している．右半分は電極の外で，深いポテンシャル井戸は原子核による電子の束縛ポテンシャルを表している．電極の外には電極電圧による電界があり，原子核のポテンシャルは図のように傾いた形となっている．この傾斜のためにポテンシャルの電極側には障壁が形成され，最外殻の電子はこの障壁をトンネルして電極に移動することができるようになる．すると原子は電子を失ってイオン化するので，この過程は電界イオン化過程と呼ばれている．電子が電極にトンネルするためには移動先が空状態でなければならない．原子が電極表面から離れているときには，電界のポテンシャルにより，最外殻の電子準位は電極のフェルミ準位よりも上にあり，電子のトンネリングは可能である．しかしこの時には電子がトンネルする距離（障壁の厚さ）が長くなり，トンネル確率は非常に小さくなってしまう．逆に原子が表面の直ぐ近くにある場合には，電子のトンネル距離は短くなるものの，電子準位がフェルミ準位よりも下がってしまうためにトンネリングが起こらない．結局のところ，電界イオン化は最外殻の準位がフェルミ準位と一致したところで専ら起こることになる．この時にも，電界が弱い時には電子のトンネル距離が長くなるので，十分な確率で電界イオン化が起きるためには数10 V/nm程度の高電界が必要になる．平面電極でこのような高電界を実現することは困難であり，通常は先端の曲率半径が数100 nm以下に尖鋭化された針状の電極が利用される．このような針状電極の先端には電界が集中するため，電界イオン化に必要な高電界も容易に実現することができる．

電界イオン化が起きると原子はイオンになるが，電極には正の高電圧が加えられているので，イオンは電界によって加速されて電極から離れてゆく．このイオンビームを利用して針状電極の先端の原子配列を拡大投影して観測する装置が電界イオン顕微鏡（FIM）であり，1951年にE. W. Müllerによって発明されて以来，多くの表面原子像の観察が行われている．これらの研究を通して，FIMの像観察に最適な電界強度（best image field, BIF）が経験的に知られており，例えばHe原子のBIFは45 V/nmである[3, 4]．電界を高くすると電界イオン化の確率は高くなりFIM像も明るくなるが，今度は電極の表面原子が電界によってイオン化して脱離する電界蒸発（field evaporation）が起きるようになり，電極表面が剥離し始める．電界蒸発が起きる閾値電界が蒸発電界であり，例えばW（タングステン）の蒸発電界は57 V/nmである[4]．この電界はHe原子のBIFよりも高く，従ってWはHe原子を用いてFIM観察可能である．逆に蒸発電界がHe原子のBIFよりも低い金属の場合には，観察中に表面原子が電界蒸発してしまうために安定して観察を行うことができず，BIFがHeより低いNeなどの原子を用いてFIM観察を行うことになる．

2.3　電界イオン化による偏極 ^{3}He イオンの生成

^{3}He原子の電界イオン化過程を考えてみることにする．基底状態ではHe原子の2つの電子はスピン反平行の状態にある．通常の電界イオン化では，どちらのスピンの電子も電極にトンネル可能であり，スピンの向きによる差異は生じない．しかし，電極のフェルミ準位付近の状態がスピン偏極していると事情は異なる．例えば図2の挿入図に示すように，電極のupスピンとdownスピンの状態がシフトしている場合には，upスピンの状態には空きがなく，downスピンの電子しか電極にトンネルすることができない．すると電界イオン化した^{3}He原子にはupスピンの電子が残されることになり，電子状態が偏極することになる．従って電界イオン化により電子偏極^{3}Heイオンが形成され，超微細相互作用により核偏極^{3}Heイオンが得られることになる．この手法の面白みは，^{3}Heの電子に直接手を加えて偏極させるのではなく，singlet状態にある2個の電子の中からdownスピンの電子だけを取り除くと，自動的に残りの電子はupスピンになることを利用している点にある．この過程は有名なEPR（Einstein-Podolsky-Rosen）問題－singlet状態にある2個の電子の一方のスピンを特定すると（両者がどれだけ離れていても）他方のスピンも自動的に確定する―を思わせるものがある．

問題はフェルミ準位付近の状態がスピン偏極してい

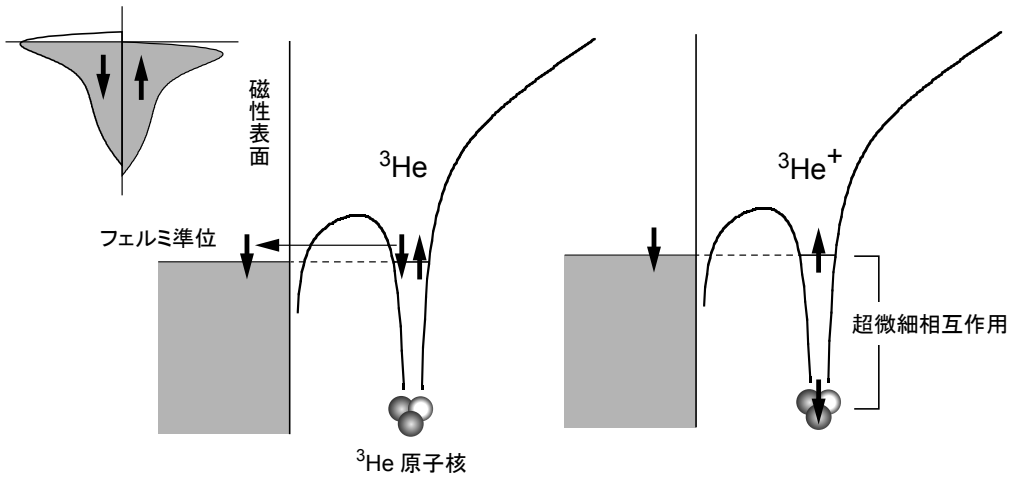


図2 電極の電子状態がスピン偏極している場合には，^{3}He 原子の電界イオン化の際に基底状態にある電子の一方（この場合には下向きスピンの電子）のみがトンネルすることができる．その結果 ^{3}He イオンは電子偏極し，超微細相互作用を介して ^{3}He の原子核が偏極する．

るような都合の良い電極があるか否かであるが，幸いなことにそのような電極は実際に存在している．それは Ni の(110) 表面で，この表面では 3*d* 電子の majority spin バンドがフェルミ準位の下に収まってしまっているためにフェルミ準位付近の空状態は minority spin 状態のみであり，ほぼ 100％偏極している．Ni(110)表面のスピン偏極のことは古くから知られており，いくつかの実験[5–8]やバンド計算[9]によってフェルミ準位付近の状態が強く偏極していることが確かめられている．特に電子偏極した He 原子を用いた脱励起分光の実験[10]では，He 原子と Ni(110)間の電子の授受（トンネルイオン化およびオージェ中性化）が確かに電子スピンに依存していることが確認されている．従って[110]方位の Ni の針状電極を作製し，高電圧を加えた状態で ^{3}He ガスを導入すれば，電極先端の(110)面での電界イオン化が起きて偏極 ^{3}He イオンが生成されることになる．イオンは電極電圧によって加速されたビームとして得られるので，応用のためのビーム光学系にとっても好都合である．

2.4 問題点

ところが実際には難点も山積している．先ず Ni 電極に加える電圧の問題がある．先に述べたように，He 原子の電界イオン化には He 原子の BIF である 45 V/nm 程度の電界が必要であるが，Ni の蒸発電界は 35 V/nm であり[4]，He 原子の BIF よりも低い．従って ^{3}He 原子を電界イオン化させようと高電圧を加えると，Ni の表面原子が急速に蒸発して表面が削られてしまう．電界を 35 V/nm 以下に保った場合にも ^{3}He 原子の電界イオン化は起きるが，先に述べたように低電界では電子のトンネル距離が増加して電界イオン化確率が非常に小さくなる．また表面から離れたところで電界イオン化する場合には，電子は遠方に拡がっている Ni(110)表面の *sp* バンドにトンネルするようになるが，*sp* バンドは偏極していないため ^{3}He イオンの電子偏極率も低下してしまう．これらは電界イオン化の問題であるが，Ni(110)表面にも問題点が存在している．Ni(110)表面のスピン偏極が確かめられているのは，バルクの大きさの Ni(110)表面についてであるが，電界イオン化が起きる Ni(110)表面は尖った針状電極の先端にある(110)面であり，実際に FIM で観察されるその大きさは直径で20原子程度しかない[11]．このように小さなサイズの表面でも，バルクと同様に 3*d* バンドが高い偏極度を示すか否かは議論を要するころである．さらに，電界イオン化は周囲よりも電界強度が高い表面のエッジ部分で優先的に起きるが，表面のエッジ部分ではなおさら 3*d* バンドの偏極度が問題視される．

以上述べてきたように，電界イオン化による偏極 ^{3}He イオンの生成が狙い通りに起きるためには，(i)蒸発電界が He の BIF よりも高く，(ii)表面の電子状態が強く偏極していて表面サイズが小さくなっても偏極度が低下しない，ような金属表面が必要である．少なくとも単体金属では 2 つの条件を満たすものは存在せず，おそらく磁性合金でも条件をクリアすることは至難ではないかと思われる．このため，この手法は未だに見果てぬ夢にとどまっている．

3. フォノンのトンネル時間

結晶のバンドギャップ内の状態にある電子は波動関数が空間のどの方向にも減衰し，固体中を伝搬する状態にはならない．同じような状態は光に対しても作ることが可能であり，屈折率の異なる媒質を周期的に配置すると，特定のエネルギーの光がどの方向にも伝搬しないように閉じ込めることができる．このような媒質の周期配列はフォトニック結晶（photonic crystal）と呼ばれており，それによって作られる光に対するエネルギーギャップが optical bandgap である．バンドギャップの大きな酸化膜を電子がトンネルするのと同様に，光子も optical bandgap を有するフォトニック結晶をトンネルすることが可能であり，これが光子トンネリング（photon tunneling）である．同様のトンネル現象は電子波や光に限らず他の波動についても成り立ち，例えばフォノンは phononic bandgap（phonon stop band とも呼ばれる）を有するフォノニック結晶（phononic crystal：音速の異なる材料の周期的な配列）をトンネルすることができる．

光子トンネリングの面白い点は，光子のトンネル時間が測定されており[12–14]，その結果によると光子は障壁を超光速でトンネルすることである．もちろんこれは見かけ上の効果であり，相対論に反しているわけではない．またトンネル時間がトンネルする距離に比例しなくなるという Hartman 効果[15]も観測されている[13]．このように光子のトンネル時間は大変に興味深い研究対象であるが，トンネル時間が非常に短いので，直ぐに実験を始めることは難しい．しかし速度の遅いフォノンであればトンネル時間も長くなり，計測もより容易に実施できるはずである．例えば図 3 のようにフォノニック結晶を配置して phononic bandgap に相当する超音波のパルスを透過させ，フォノニック結晶が無い場合との時間差を測定すればよい．

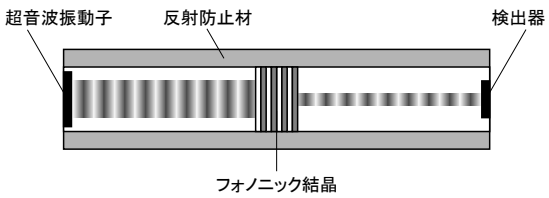


図 3　フォノンのトンネル時間の測定．フォノニック結晶を作製し，超音波を入射して透過波を観測する．Phonon bandgap に相当する超音波の場合には，波はフォノニック結晶をトンネリングにより透過する．音波には縦波と横波があるので，簡単のため媒質には縦波しか伝搬しない液体を用いる．

上記のような実験は，構成は簡単であるが，問題点も存在している．第 1 に光は横波だけであるが，音波には縦波と横波があり，それぞれ速度が異なっている．媒質を縦波だけが伝搬する液体にするとモードの問題はなくなるが，界面では縦波と横波が変換するモード変換が起きることがあるため，障壁としては全てのモードの伝搬を阻止する 3 次元フォノニック結晶を用いる必要がある．また音波の場合には，固体中の音速は液体中の音速よりも速いので，フォノンが古典的にフォノニック結晶を透過した場合の到達時間は，液体だけの場合の到達時間よりも短くなる．従って確かにフォノントンネリングを観測していることを立証するためには，フォノニック結晶の厚みを変化させて到達時間の障壁幅依存性を調べなければならない．

退職時の講演ではこのような問題点を指摘したにとどまっていたが，実際には2002年にフォノニック結晶をトンネルするフォノンのトンネル時間が Yang ら[16]によって計測されている．彼らはタングステンカーバイドの 3 次元フォノニック結晶を水中に沈め，phononic bandgap に相当する超音波のトンネル時間を計測している．フォノニック結晶の透過時間は水だけの場合よりも短くなるので，フォノニック結晶の厚みを変えて測定を行い，実験結果が確かにトンネリングと整合することを検証している．

このようにフォノンのトンネル時間計測は他の研究者に先行されてしまったが，もともと研究の種として考えていたことは，フォノニック結晶を用いずに図 4 のように全反射を利用することである．全反射条件で波を媒質 A から媒質 B に入射した場合，波は減衰する波（evanescent 波）として媒質 B 内に侵入する．B

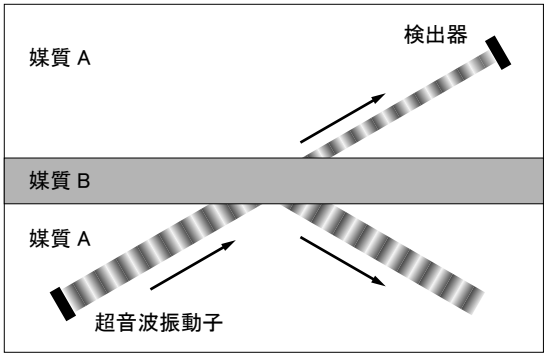


図 4　全反射を利用したフォノンのトンネリング．媒質 A から B に全反射条件で入射した超音波の一部は B をトンネルして通過する．全反射を利用するとフォノニック結晶は不要になる．

層の厚みが薄い場合には，AB 界面で全反射した波の一部は減衰しながら B を透過し，再び通常の波として A を伝搬してゆく．この過程は波のトンネリングと解釈することが可能であり，光子のトンネリングを利用した顕微鏡は近接場光顕微鏡（SNOM）の 1 種として実用化されている．フォノントンネリングの実験では，モードの問題をなくすために図 4 において A を液体とし，A から B に全反射条件で超音波を入射して透過してくる波を検出する．この場合にもトンネリングの検証のためには，障壁の厚みを変化させて（あるいは超音波の入射角を変化させて）透過時間の障壁幅依存性の測定を行うことが必要となる．全反射の実験は 3 次元フォノニック結晶が不要になるが，AB 界面でモード変換された音波（界面波を含む）の回り込みを阻止できないことが欠点で，この影響を如何にして排除するかが問題として残る．

なお，真空ギャップを介したフォノントンネリング[17, 18]が，ナノ材料間の熱伝達の観点から最近注目されているが，これはギャップ内の evanescent 電磁界と結合することによるトンネリングであり，これまで述べてきたような純粋なフォノントンネリングとは機構が異なっている．

4. おわりに

今回は実現に至らなかった研究の種を 2 つ紹介したが，多くの研究者が競い合う現在では，研究の種をいつまでも新鮮な種として保持することは極めて難しい．よほど未踏の領域でない限り，世界の数多の研究者が同じような研究に携わっており，ほとんどの研究の種は誰かが先んじて発芽させてしまうことになる．実際，講演を行ったときには「見果てぬ夢」であると思っていたフォノンのトンネル時間測定も，既に実現されてしまっている．電界イオン化による偏極 ^{3}He イオンの生成も，そのうちに誰かが試みることであろう．しかしながら，研究者が集中するような領域でも，新鮮な種が見つからず保持される場合もある．走査トンネル顕微鏡（STM）の初期の頃，多くの研究者はグラファイトをスコッチテープで剥がしてきれいな表面にすることを日課のようにしていたが，その中の誰一人として，ごみ箱に捨てたスコッチテープに重要な材料がくっついているなどとは夢にも思わなかった．このグラフェンの例は，競争の激しい領域でも，大小を問わず新鮮な種が眠っていることを示している．それらを見つけることは研究者の大いなる楽しみでもある．

参考文献

1) M. Leduc, J. de Phys. Colloq. **51** (C6), 317 (1990).
2) F. D. Colegrove, L. D. Schearer, and G. K. Walters, Phys. Rev. **132**, 2561 (1963).
3) E. W. Müller and T. T. Tsong, *Field Ion Microscopy: Principles and Applications* (Elsevier, New York, 1969).
4) T. T. Tsong, *Atom-Probe Field Ion Microscopy: Field Ion Emission, and Surfaces and Interfaces at Atomic Resolution* (Cambridge University Press, Cambridge, 2005).
5) E. Kisker, W. Gudat, E. Kuhlmann, R. Clauberg, and M. Campagna, Phys. Rev. Lett. **45**, 2053 (1980).
6) J. Unguris, A. Seiler, R. J. Celotta, D. T. Pierce, P. D. Johnson, and N. V. Smith, Phys. Rev. Lett. **49**, 1047 (1982).
7) C. Rau, J. Magn. Magn. Mater. **30**, 141 (1982).
8) H. Hopster, R. Raue, G. Güntherodt, E. Kisker, R. Clauberg, and M. Campagna, Phys. Rev. Lett. **51**, 829 (1983).
9) H. Krakauer, A. J. Freeman, and E. Wimmer, Phys. Rev. B **28**, 610 (1983).
10) M. Onellion, M. W. Hart, F. B. Dunning, and G. K. Walters, Phys. Rev. Lett. **52**, 380 (1984).
11) G. L. Kellogg, Phys. Rev. Lett. **67**, 216 (1991).
12) A. M. Steinberg, P. G. Kwiat, and R. Y. Chiao, Phys. Rev. Lett. **71**, 708 (1993).
13) Ch. Spielmann, R. Szipöcs, A. Stingl, and F. Krausz, Phys. Rev. Lett. **73**, 2308 (1994).
14) S. Longhi, M. Marano, P. Laporta, and M. Belmonte, Phys. Rev. E **64**, 055602R (2001).
15) T. E. Hartman, J. Appl. Phys. **33**, 3427 (1962).
16) S. Yang, J. H. Page, Z. Liu, M. L. Cowan, C. T. Chan, and P. Sheng, Phys. Rev. Lett. **88**, 104301 (2002).
17) I. Altfeder, A. A. Voevodin, and A. K. Roy, Phys. Rev. Lett. **105**, 166101 (2010).
18) V. Chiloyan, J. Garg, K. Esfarjani, and G. Chen, Nature Commun. **6**, 6755 (2015)

大会記念講演

三菱マテリアルの資源事業戦略

小　野　直　樹*

Mineral Resources Business Strategy of Mitsubishi Materials Corporation

by Naoki ONO

三菱マテリアルの資源事業戦略

目次

1. 資源部門の概要
2. 資源部門の事業展開
   （金属／セメント／石炭／環境・エネルギー）
3. 資源部門の課題　（人材育成）
4. まとめ

2017年6月3日　水曜会大会
三菱マテリアル株式会社
取締役副社長執行役員　小野　直樹

MITSUBISHI MATERIALS

1

*三菱マテリアル㈱　取締役副社長執行役員

（1．資源部門概要）

当社資源関連事業概要

【金属事業】
① 当社製錬所への銅鉱石安定供給
② 鉱山事業からの配当による収益確保

【セメント事業】
① セメント工場への原料供給
② 石灰石製品の製造
③ セメント製造用等の石炭確保

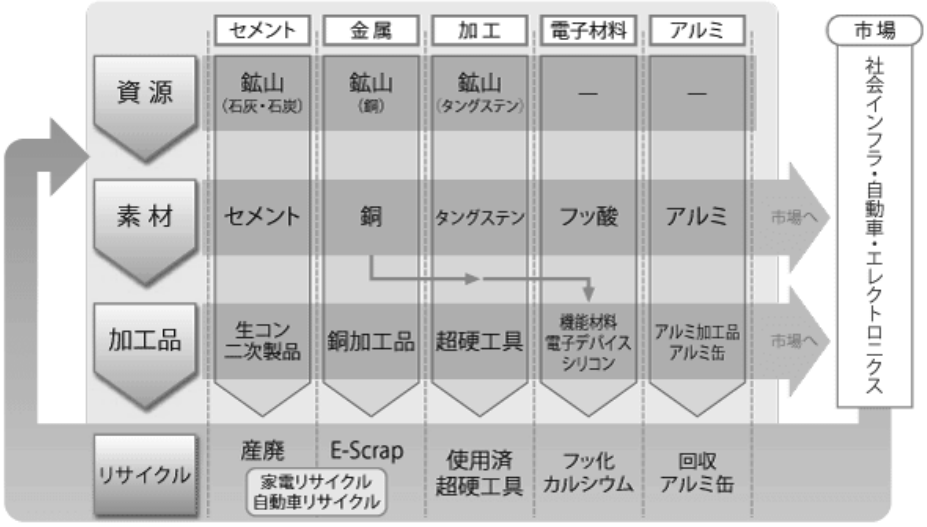
【エネルギー事業】
① 再生可能エネルギーの創出
② 地熱・水力発電所、太陽光発電の安定操業

【リサイクル事業】
① 循環型社会の構築
② 産業廃棄物・副産物リサイクル（セメント事業）
③ スクラップ・レアメタルのリサイクル（金属事業）
④ 家電リサイクル、アルミ缶リサイクル　等

MITSUBISHI MATERIALS

（1．資源部門概要）

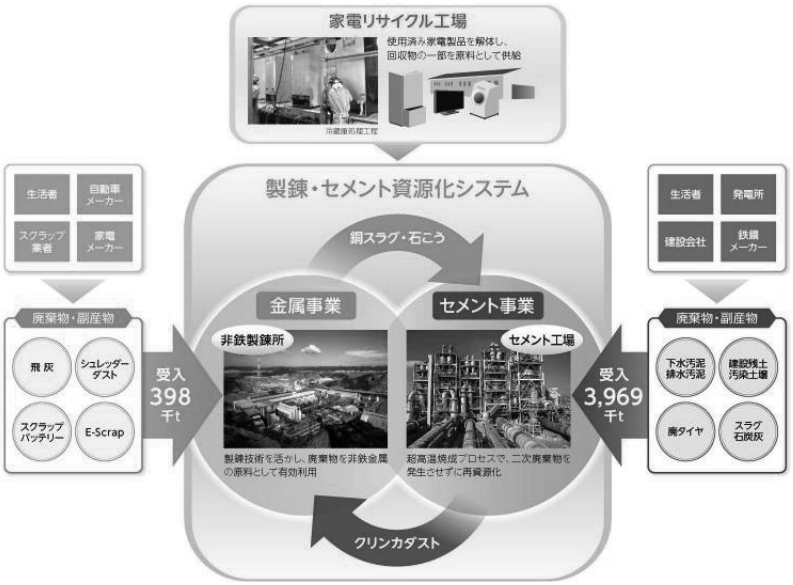
循環型ビジネスモデル



MITSUBISHI MATERIALS

（1．資源部門概要）

製錬・セメント資源化システムの展開



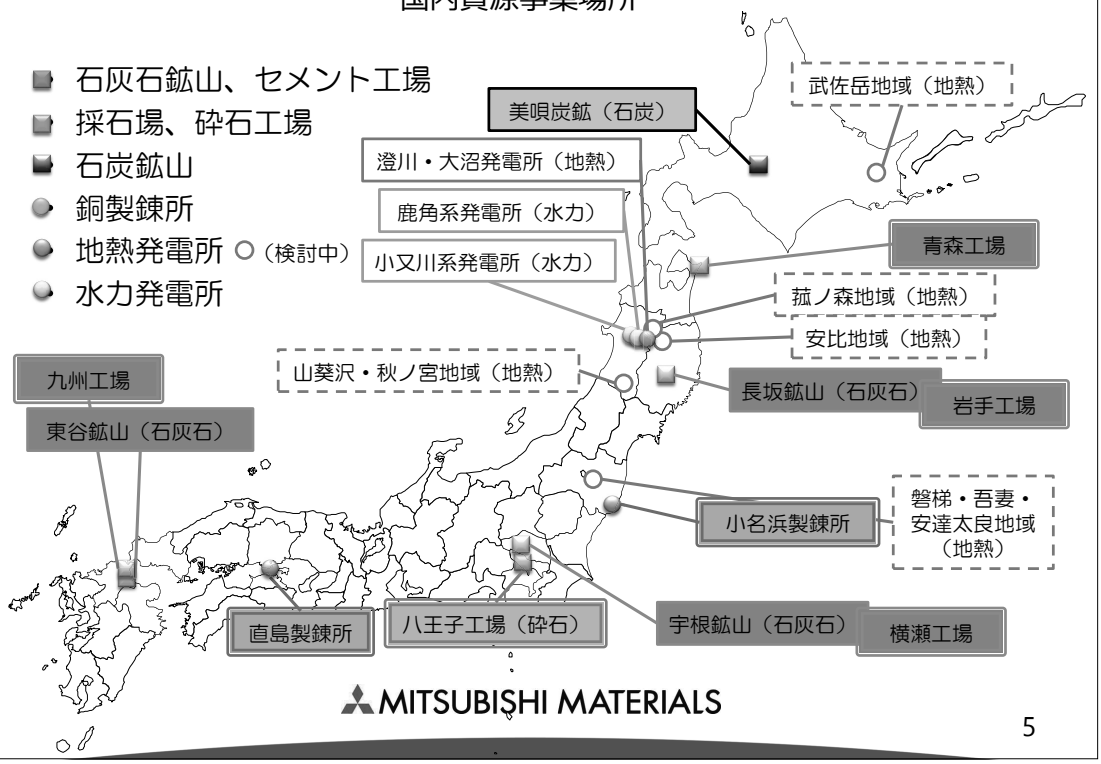
MITSUBISHI MATERIALS

4

（1．資源部門概要）

国内資源事業場所

- 石灰石鉱山、セメント工場
- 採石場、砕石工場
- 石炭鉱山
- 銅製錬所
- 地熱発電所 ○（検討中）
- 水力発電所

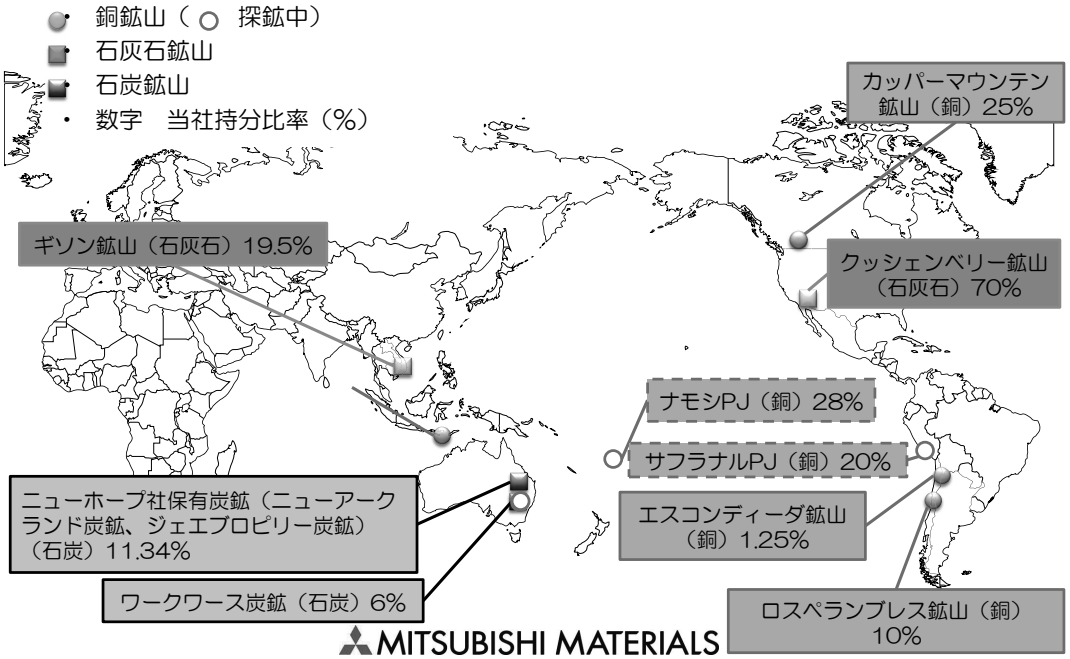


MITSUBISHI MATERIALS

5

（1．資源部門概要）

海外資源事業場所



MITSUBISHI MATERIALS

6

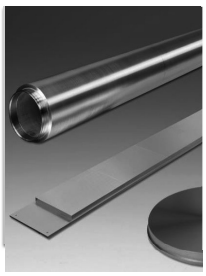
（1．資源部門概要）

資源技術者の配置

セメント事業

金属事業

加工事業


電子材料事業

環境・エネルギー事業

経営戦略本部（経営企画部、事業戦略部、法務部、経理・財務部、改革推進部）

技術統括本部（ｼｽﾃﾑ企画部、生産技術部、ものづくり推進部、**資源部**、他）

総務統括本部（総務部、人事部、経営監査部）

資源技術者は、ｾﾒﾝﾄ事業、金属事業、環境・ｴﾈﾙｷﾞｰ事業、資源部等に組織横断的に配置

MITSUBISHI MATERIALS

7

（1．資源部門概要）

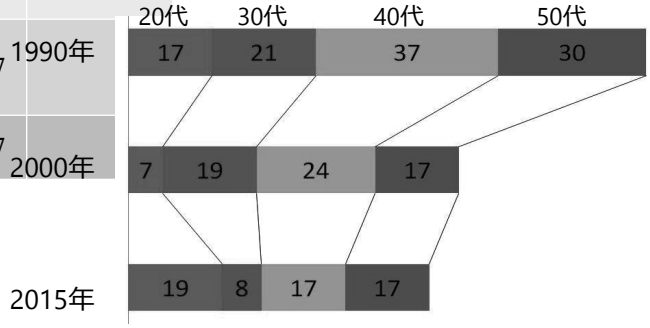
資源技術者の現況

専攻別人材推移

	1990年	2000年	2015年
地質技術者	38	25	24
採鉱技術者	58	35	30
選鉱技術者	9	7	
合　計	105	67	

・2008年以降、若手社員（中途含む）を積極的に採用。
・国内石灰石、地熱、炭鉱、海外銅鉱山へ人事ローテーション実施

世代別人材推移



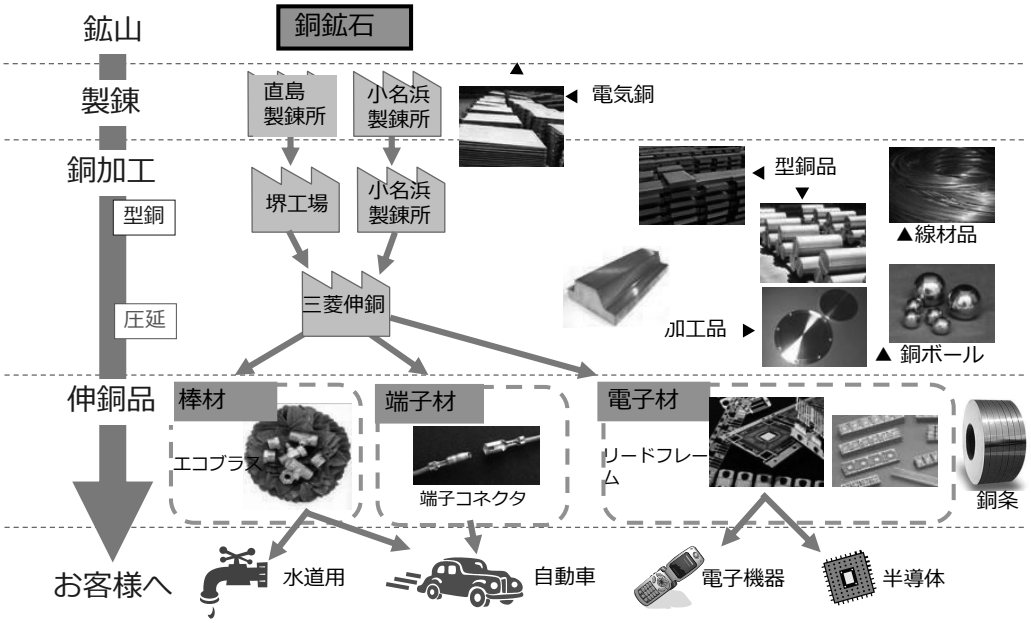
MITSUBISHI MATERIALS

8

（2．事業展開／金属）

金属事業

～鉱山・製錬から加工まで垂直価値連鎖で付加価値増大～



MITSUBISHI MATERIALS

9

（2．事業展開／金属）

金属事業の方針と重点戦略

中長期の目標

- **新規鉱山開発と製錬とのシナジー拡大**
- **リサイクル事業の拡大・高収益化**
- **高ロールマージン利益率の構築**

事業方針

ものづくりからリサイクルまで金属を通じた循環型社会への貢献

重点戦略

	イノベーションによる成長の実現	循環型社会の構築を通じた価値の創造	成長投資を通じた市場プレゼンスの拡大	継続的な改善を通じた効率化の追求
鉱山			**◆新規案件の開拓**	**◆既存案件改善・見極め体制強化**
製錬		**◆E-Scrap処理拡大**		**◆プロセスの高効率化** **◆製錬事業の最適化**
銅加工	**◆顧客ニーズにあった製品の販売** ・端子材・新合金の増販 ・高性能めっきの開発	**◆合金リサイクルの推進**	**◆Luvata社とのシナジー** ・シナジー効果発揮 ・グローバル販売体制確立 **◆シール事業拡充**	**◆圧延生産体制強化** **◆押出生産コスト競争力強化**

MITSUBISHI MATERIALS

10

（2．事業展開／金属）

中期戦略（３年）での対応

1. 既存案件の改善、方向性の見極め

2. 新規鉱山投資案件の開拓
   - 長期的には支配鉱比率50%が目標

3. 鉱山投資のための体制強化
   ① 既存パートナーとの連携強化
   ② 証券、銀行、コンサルタント等との定期協議(情報収集)
   ③ 資源技術者の増強
   ④ 製錬、生産技術との連携強化、技術力向上
   ⑤ 投資判断に必要な経営戦略、法務、経理、財務能力確保

４．製錬事業の最適化（原料面での対応）
   ① 第三ソースの開拓（既存銅精鉱のCu低下、不純物増加対策）
   ② 銅精鉱の不純物除去対策
   ③ 大学研究機関との共同研究

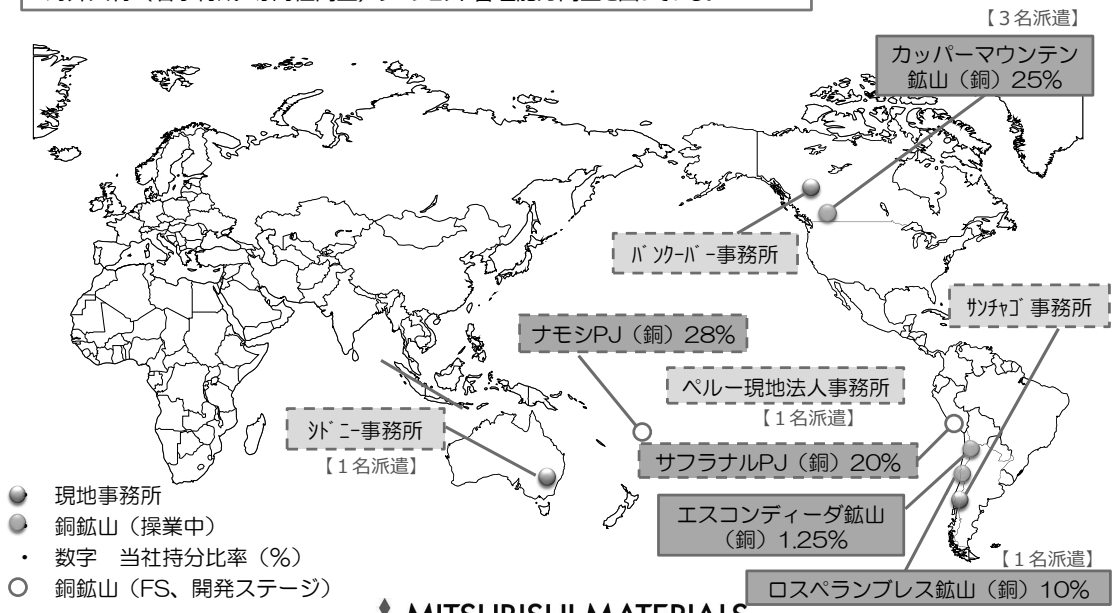
MITSUBISHI MATERIALS

11

（2．事業展開／金属）

人材育成方針

●現在、銅鉱山管理を中心に計7名の資源技術者を海外派遣
●海外人材（若手育成・専門性向上）プロジェクト管理能力向上を図っている。

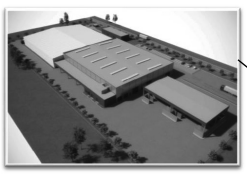


MITSUBISHI MATERIALS

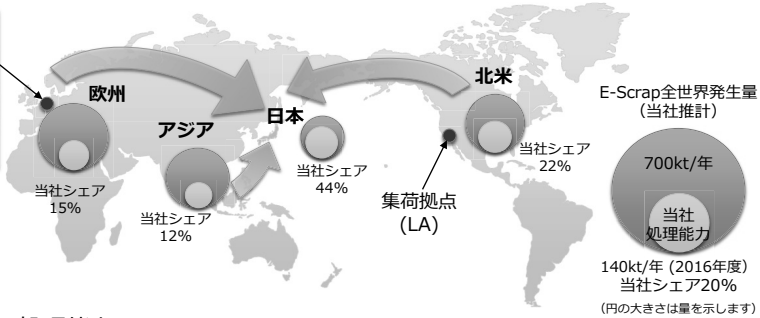
12

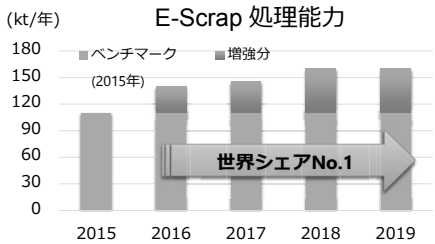
（2．事業展開／金属）

E-Scrap処理拡大



MMMR
(MM Metal Recycling B.V.)設立
受入サンプリング能力増強
+17kt/年 (2017年～)





直島製錬所
受入サンプリング、分析、
処理能力増強 (2016年～)

小名浜製錬所
処理能力増強
+3kt/年 (2018年～)

MITSUBISHI MATERIALS

13

（2．事業展開／セメント）

セメント事業の方針と重点戦略

中長期の目標

- **効率性におけるセメント業界のリーディングカンパニー**
- **海外ではローカルエリアチャンピオン**

事業方針

- **成熟化して縮小する国内市場で優位形成**
- **国内事業から得られる安定的なキャッシュを支えに海外事業で成長**

重点戦略

イノベーションによる成長の実現	循環型社会の構築を通じた価値の創造	成長投資を通じた市場プレゼンスの拡大	継続的な改善を通じた効率化の追求
◆研究開発・技術革新 ・廃棄物のセメント再利用技術開発 ・コンクリート技術の高度化 ・CO_2 削減	**◆環境事業拡大** ・成長分野新規事業化 ・熱エネルギー代替率向上	**◆国内競争基盤強化** ・九州工場／国際競争力強化 ・川下事業／首都圏他販売基盤整備強化 **◆米国事業拡充** ・生コン事業拡充 ・ターミナル増強新設 **◆海外新規拠点の開拓**	**◆国内・米国セメント製造技術の改善** ・安定操業体制確立 ・低コスト化 ・省エネ追及 ・現場力向上

（2．事業展開／セメント）

石灰石鉱山の安定操業

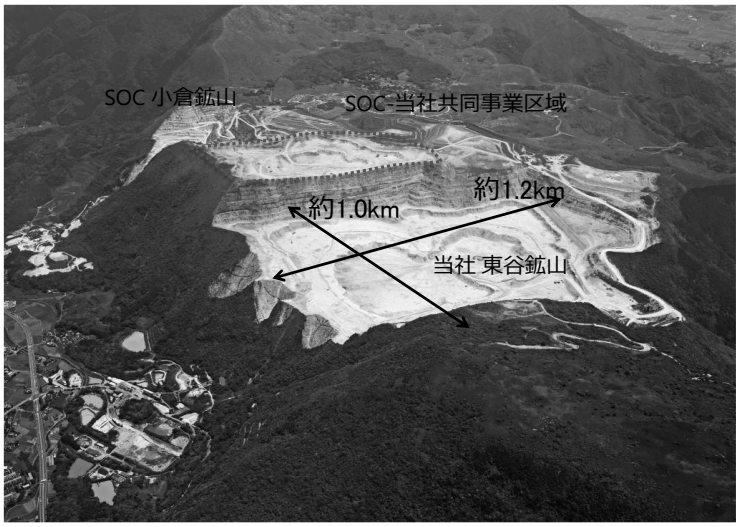
- 東谷鉱山
  - **共同開発区域**

  ※現状国内石灰石鉱山の新規開発は難しく、他社との協業による既存大型石灰石鉱山の永続的鉱山運営を図る）
  - **石灰石製品安定生産**
- 長坂鉱山
  - **長期採掘計画の立案（震災復興需要終了後の需要減少への対応）**
- 宇根鉱山
  - **最終残壁安定化（対策工事、原因解明、モニタリング）**

（2．事業展開／セメント）

石灰石鉱山（東谷鉱山）

役割
- 当社セメント工場への石灰石原石の安定供給
- 石灰石製品の製造



所在地：北九州市小倉南区
（平尾台）
日本有数の石灰石鉱山
生産量　1,073万t（2015年）

日本最大規模の当社ｾﾒﾝﾄ工場
（九州工場）に原石供給。
地元環境に配慮した採掘。

※隣接鉱山（住友大阪セメント
小倉鉱山との共同採掘事業）

MITSUBISHI MATERIALS

16

（2．事業展開／セメント）

石灰石鉱山（宇根鉱山）

所在地：埼玉県秩父郡
生産量　240万t（2015年）
当社ｾﾒﾝﾄ工場（横瀬工場）に原石供給。子会社の生石灰焼成用原石。
最終残壁の安定性（斜面崩壊防止）を考慮した採掘設計（地質、岩盤力学）。

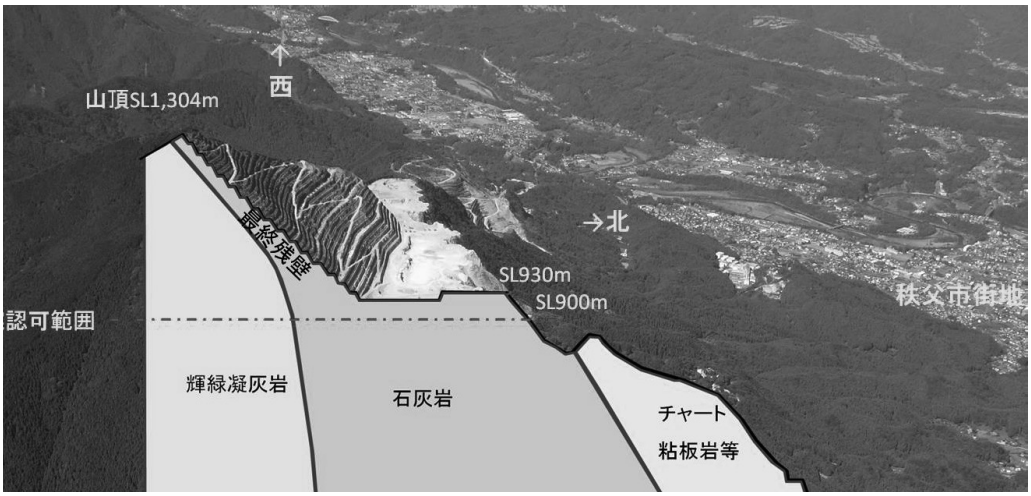
MITSUBISHI MATERIALS

17

（2．事業展開／セメント）

石灰石鉱山（宇根鉱山）

鉱床条件により、平均傾斜約45度の最終残壁を造成しながら採掘。
終掘後は、幅5km・高さ800mに及ぶ長大残壁となる計画であることから、
大学の岩盤力学等の専門家と産学共同で研究を行い、残壁の安定性を担保。

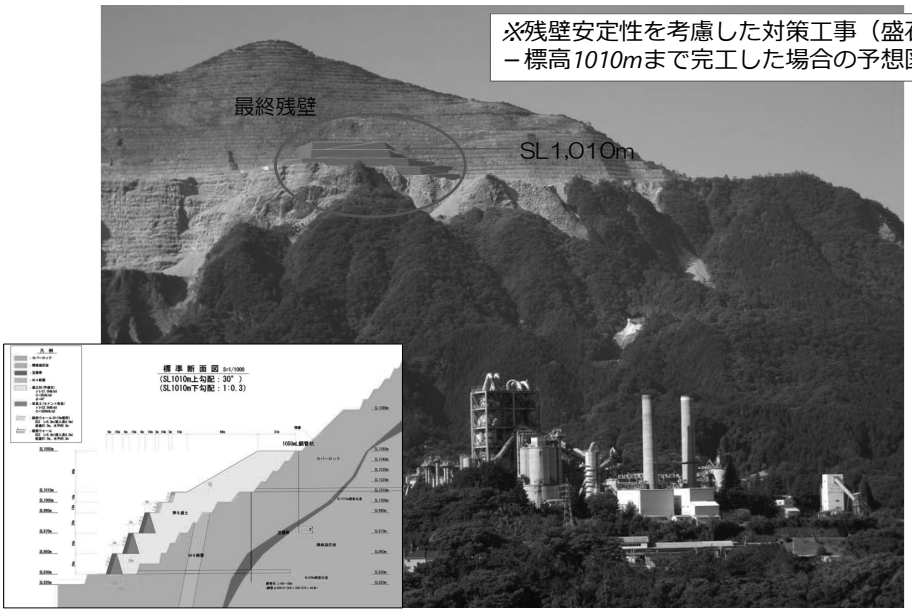


MITSUBISHI MATERIALS

18

（2．事業展開／セメント）

宇根鉱山最終残壁管理

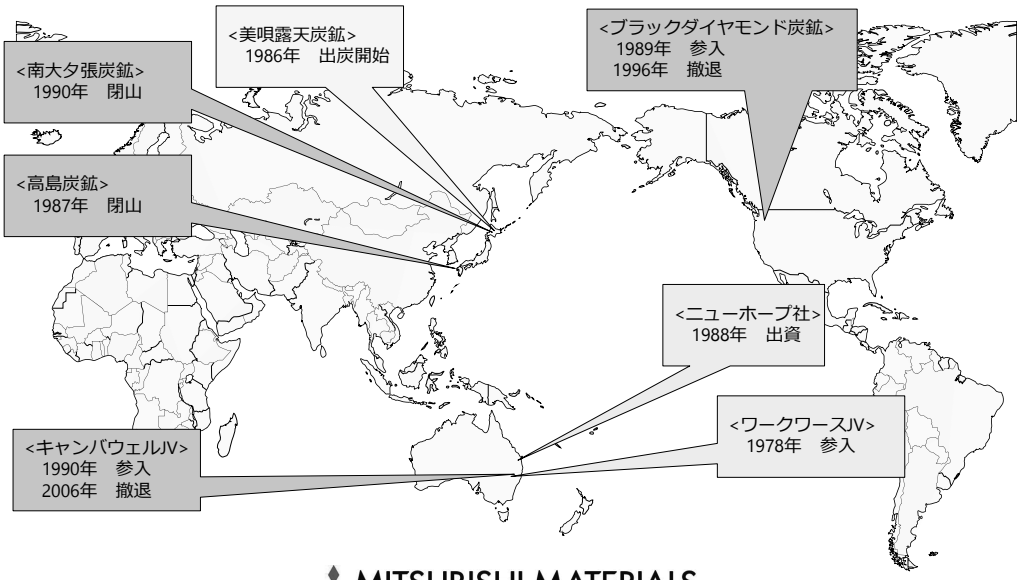


MITSUBISHI MATERIALS

19

（2．事業展開（石炭））

石炭事業
～国内坑内採掘からの撤退⇒海外への進出～



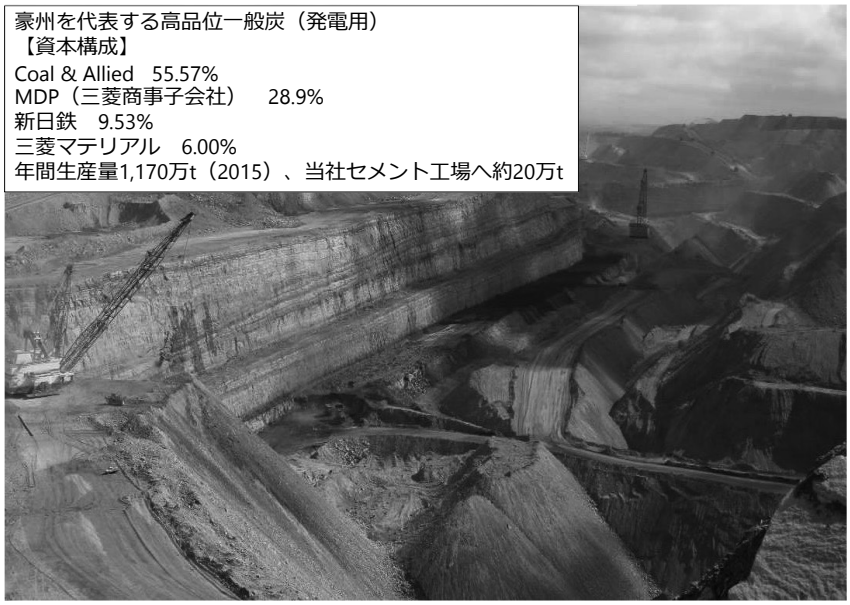
MITSUBISHI MATERIALS

20

（2．事業展開／石炭）

石炭事業（海外）
ワークワース炭鉱（豪州NSW州）

豪州を代表する高品位一般炭（発電用）
【資本構成】
Coal & Allied　55.57%
MDP（三菱商事子会社）　28.9%
新日鉄　9.53%
三菱マテリアル　6.00%
年間生産量1,170万t（2015）、当社セメント工場へ約20万t



MITSUBISHI MATERIALS

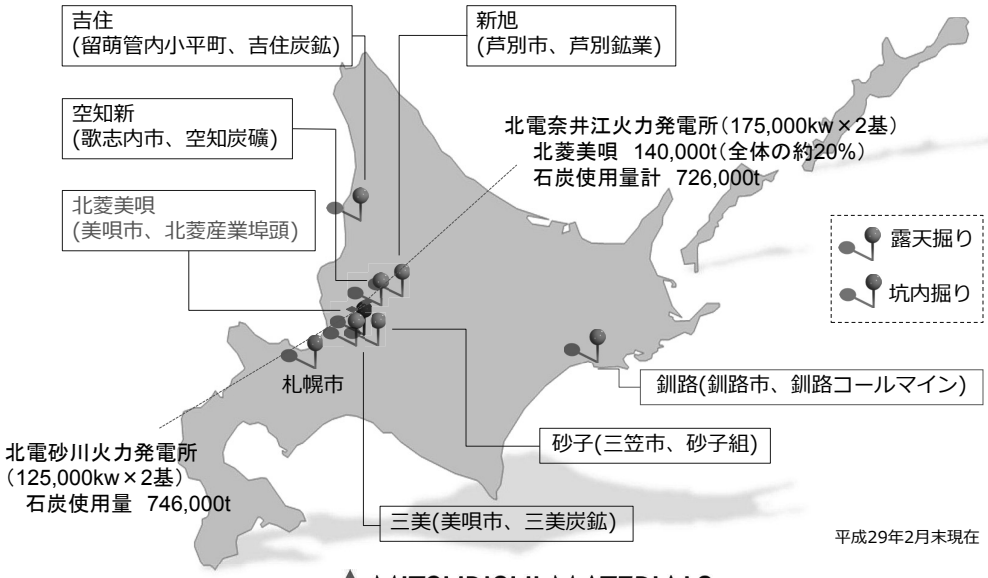
21

（2．事業展開／石炭）

石炭事業（国内）

北海道内の炭鉱（計7炭鉱）

※美唄・空知地域：内陸火力発電所、王子製紙向けに小規模炭鉱が6炭鉱操業中

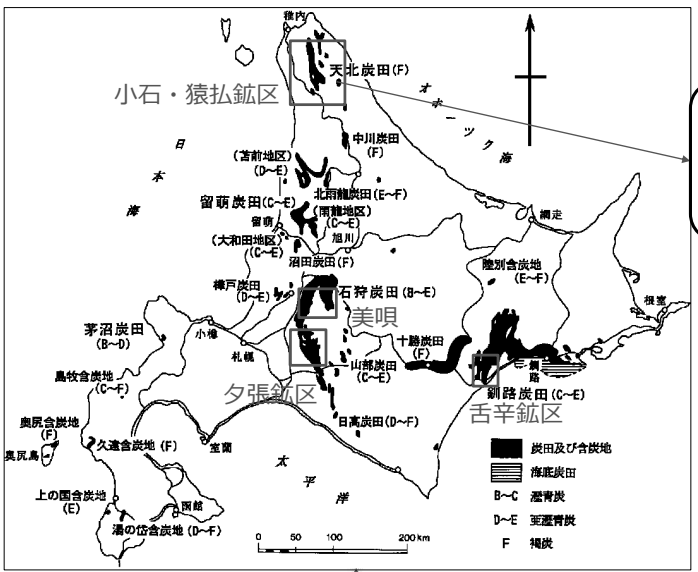


MITSUBISHI MATERIALS

（2．事業展開／石炭）

水素社会への対応（褐炭利用）

・当社は北海道4地域で石炭鉱区保有。
・当社保有の北海道内褐炭を利用した事業展開模索中



天北炭田褐炭炭量：144,000千トン
（平成 21 年度 JCOAL 自主事業 主要産炭国の資源量調査
日本の石炭資源量調査 報告書）

MITSUBISHI MATERIALS

（2．事業展開／環境・エネルギー）

環境・エネルギー事業の方針と重点戦略

中長期の目標		事業方針
	(環境リサイクル) ｽﾃｰｸﾎﾙﾀﾞｰに信頼されるﾘｻｲｸﾙ事業の創設、拡大 (再生可能エネルギー) 地熱発電に関する総合力国内No.1企業 (原子力) 再処理等ｻｲｸﾙ分野でのﾒｲﾝﾊﾟｰﾄﾅｰ事業環境に応じた新規分野への展開 (石炭) 環境対策を軸に、石炭の供給・開発を通じた当社独自のﾋﾞｼﾞﾈｽ展開	当社グループの特色を活かしたリサイクル事業及びエネルギー事業を推進することによる、持続可能で環境負荷の低い循環型社会構築への貢献

重点戦略

	イノベーションによる成長の実現	循環型社会の構築を通じた価値の創造	成長投資を通じた市場プレゼンスの拡大	継続的な改善を通じた効率化の追求
環境リサ	◆太陽光パネル、LIB等の新規リサイクル品目への展開	◆飛灰処理事業の開始 ◆バイオマスリサイクル事業開始	◆次世代自動車リサイクルの拠点拡大 ◆M&Aによる事業拡大	◆処理の自動化推進
再生エネ			◆新規地熱発電事業の拡大	◆東北地方における再生可能エネルギー・オペレーションの効率化実現
原子力	◆廃棄物関連技術を武器に廃止措置業務参入 ◆原子力関連技術の非原子力分野への展開	◆福島環境修復事業の更なる推進		

MITSUBISHI MATERIALS

24

（2．事業展開／環境・エネルギー）

環境・エネルギー事業

環境リサイクルへの取り組み

素材産業としての特徴・機能を活用し、最終処分場に依存することの無い、ステークホルダーに信頼されるリサイクル事業の創設、拡大を通して循環型社会構築の一役を担う。

再生可能エネルギーへの取り組み

当社が培ってきた経営資源をベースとして、再生可能エネルギー事業を拡大し、環境負荷の少ないエネルギーを安定供給することで持続可能な社会の構築に貢献する。

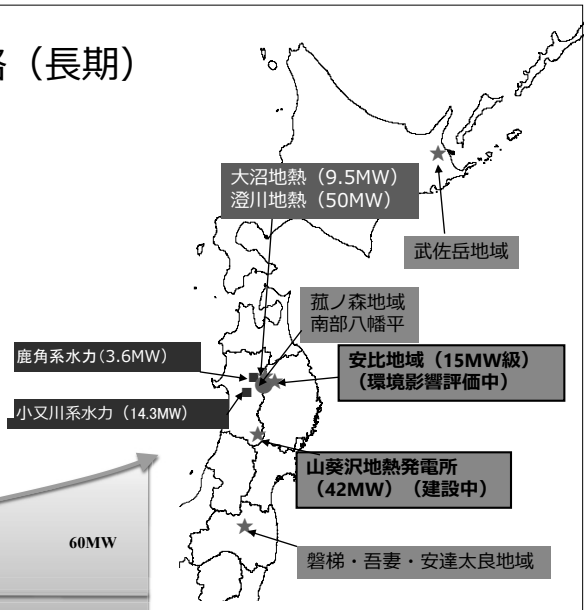
MITSUBISHI MATERIALS

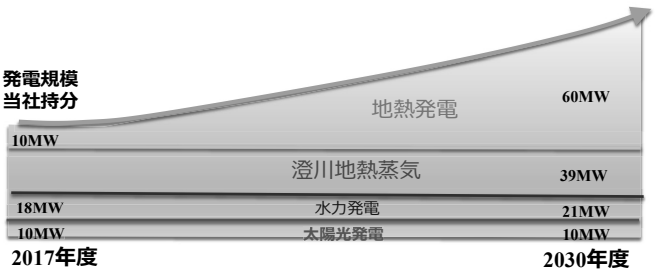
25

（2．事業展開／環境・エネルギー）

事業戦略（長期）

- 地熱発電
  新規地熱ﾌﾟﾛｼﾞｪｸﾄを積極的に進める（但し、事業の特性上、時間をかけた成長となる）
- 水力発電
  承認済みの水力発電所更新・新設を実施し、長期での安定収益化を実現する。
- 太陽光発電
  ５地点の安定操業、安定収益の確保。



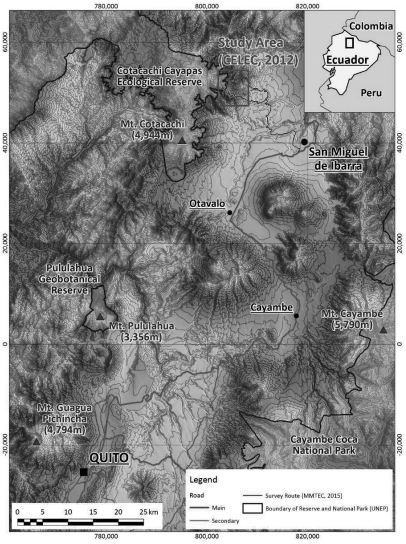


MITSUBISHI MATERIALS

（2．事業展開／環境・エネルギー）

新規地熱開発案件（海外調査案件）

◇地熱事業は今後も東北地方で展開予定。
◇その過程において技術の蓄積を図り、海外を含めた事業展開を模索する。
◇2016年度から、JICA案件としてエクアドルで調査実施中（三菱ﾏﾃﾘｱﾙﾃｸﾉ社実施）



発注者：独立行政法人国際協力機構（JICA）
受注者：三菱マテリアルテクノ(株)
（調査共同企業体代表者）、
三菱マテリアル(株)

① 本JICA案件はエクアドル政府から円借款要請のあったチャチンビロ地熱発電所建設事業について、エクアドル電力公社（CELEC）が実施した予備調査の補完調査を行った上で調査井の詳細仕様を決定のうえ、調査井掘削（１本）を実施し、事業化調査の内容案作成を行うコンサルティング業務。

② 調査期間は2016（平成28）年２月～2018（平成30）年５月

MITSUBISHI MATERIALS

（2．事業展開／環境・エネルギー）

当社が管理する国内休廃止鉱山

◆ 閉山後の維持管理は最終鉱業権者の責務。
◆ 2011年東日本大震災後、集積場の耐震基準について改正。
◆ 当社集積場の内、耐震基準を満たさない休廃止鉱山の対策工事に着手、継続中。

☆は観光坑道を設置している鉱山
（史跡土肥金山、史跡生野銀山、史跡佐渡金山、史跡尾去沢鉱山）

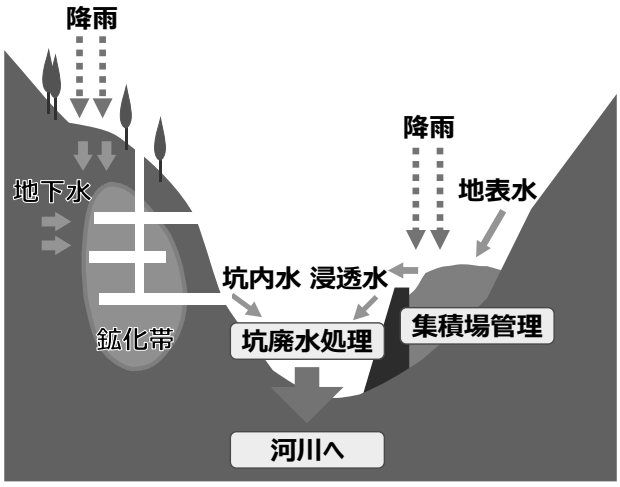
MITSUBISHI MATERIALS

28

（2．事業展開／環境・エネルギー）

当社が管理する国内休廃止鉱山

◆ 耐震基準に応じた対策工事の適切な実施。
◆ 法、手順書等に基づく最適な休廃止鉱山管理体制構築。
◆ 将来的な環境負荷を低減、新たな技術が開発された場合の導入も視野。



MITSUBISHI MATERIALS

29

（2．事業展開／環境・エネルギー）

当社が管理する国内休廃止鉱山

集積場管理
採掘に伴う岩石や鉱さい、坑廃水処理で発生した殿物を集積。
地震や豪雨による集積場の崩れを防止すべく日常管理を実施。

集積場（生野鉱山）

集積場（八谷鉱山）

坑道・坑口の管理
坑内水導水のため、坑道の補修点検を実施。使用しない坑口は侵入防止、崩落による危害防止のため閉塞。

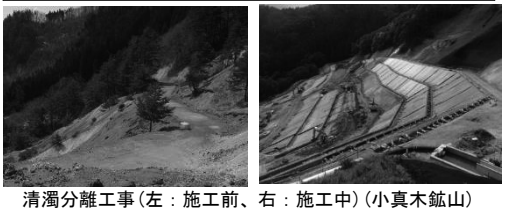
坑口閉塞工事（左：施工前、右：施工後）（佐渡鉱山）

災害防止・恒久対策
集中豪雨の年間発生件数は増加傾向にあり、処理施設の改善や災害防止が求められる。各事業所は台風や豪雨などによる土砂災害や処理水の増大に対応するため、鉱山施設内の設備増強を実施。

増水による災害（細倉鉱山）

土石流による災害（千歳鉱山）

発生源対策工事
秋田県小真木鉱山で岩盤が露出した地表面の大規模な被覆工事を実施中。降雨が鉱化帯へ接触することを防ぎ、処理水量や汚濁負荷量の低減が期待可能。


清濁分離工事（左：施工前、右：施工中）（小真木鉱山）

MITSUBISHI MATERIALS

30

（3．課題）

人材育成方針

国内資源事業

- 石灰石鉱山の安定操業
  （セメント工場への寄与）
- 地熱プロジェクト、発電所管理
- 休廃止鉱山管理
- 将来の資源体制構築

海外資源事業

- 金属事業
  ①既存鉱山管理
  ②新規案件遂行（ｻﾌﾗﾅﾙ他）
  ③案件発掘
- 法務、財務面での鉱山プロジェクト管理
- 海外セメント事業、石炭事業支援

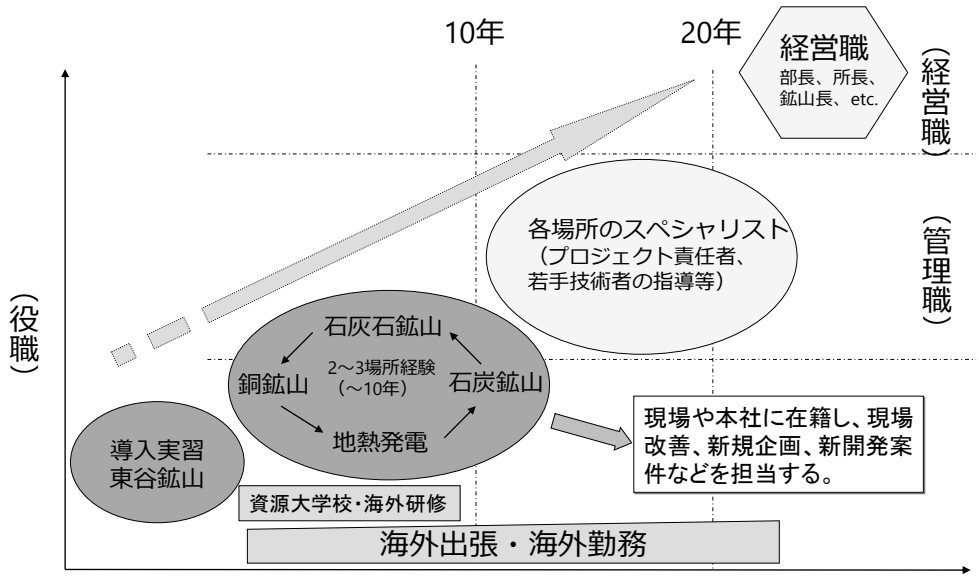
●選鉱、坑内採掘技術向上
●現場力向上（鉱山基幹職育成・技能伝承）
●海外人材（若手育成・専門性向上）
●プロジェクト管理能力向上

MITSUBISHI MATERIALS

31

（３．課題）

人材育成方針



MITSUBISHI MATERIALS

32

まとめ

当社の企業理念である「人と社会と地球のために」の下、中長期の目標である「主要マーケットにおけるリーディングカンパニー」を目指すためには、当社の各事業がいずれも、資源をベースにしていることから、当社の資源部門の果たすべき役割は大きく、かつ、重要である。
資源の安定的な供給によって各事業を支えていくことにとどまらず、資源事業そのものの収益により、企業価値の向上を図っていきたいと考えている。
また、最近は、ESG投資やSDGsなどへの関心の高まりを受け、長期的な価値創造の姿も求められている。資源部門はこうした点でも、大きな貢献を果たせるものと考えている。

一方、今後は、当社のみならず産業界全体における資源人材の育成が必須である。
当社では、求めるリーダー像として、①人格・気概、②事業構想力、③構想実現力を掲げている。資源事業に携わる中で、いずれも磨き上げていくことができる要素と考えている。

資源に関わる事業を通じて、育成された人材の中から、会社経営そのものを担う人材が数多く輩出されんことを切に願っている。

以上

MITSUBISHI MATERIALS

33

大会記念講演

環境調和社会の実現を目指す製鉄技術開発
－見える化によるイノベーション－

上　島　良　之*

Advanced Technology of Iron and Steel Production to Construct Environmentally Harmonized Society: Role of Visualization in Promoting Innovation

by Yoshiyuki UESHIMA

1. は　じ　め　に

この度は，水曜会大会特別講演という大変光栄且つ貴重な機会を与えて頂き，誠に有難うございました．大会当日は村上陽太郎先生をはじめ，40年前の学生時代にご指導頂きました先生方や，現役の先生方，同窓生の皆様にお目に掛かることができ，嬉しく存じました．会場に入った途端に，気持ちが40年前に戻りました．右も左もわかっていない学生時代に，冶金の原理，工学的な思考，問題に遭遇した時のものの考え方，更には人としての生き方のヒントなど，気鋭の先生方と学友に囲まれここで学ぶことができ，小生は本当に幸運であった，と改めて感じた次第です．

題目は，当社の製鉄技術開発に関するものですが，博士課程の研究活動の中で実感した試行錯誤の価値についても，追加して最後に申し述べたく思います．一個人の拙い体験ですが，若い方々のご参考になれば幸いです．

2.　鉄鋼業の位置づけと製鉄技術開発

日本の貿易収支と製造業の活力，鉄鋼業の位置づけと当社の製鉄技術開発の考え方について述べる．

2.1　日本の貿易収支と製造業の活力

天然資源に乏しいわが国は，原材料とエネルギー資源を輸入し，これを付加価値の高い工業製品に生まれ変わらせて輸出する，いわゆる加工貿易により成り立っていることは言うまでもない(図１)．グローバル市場で活動されている国内の運輸・産業機械・重工・化

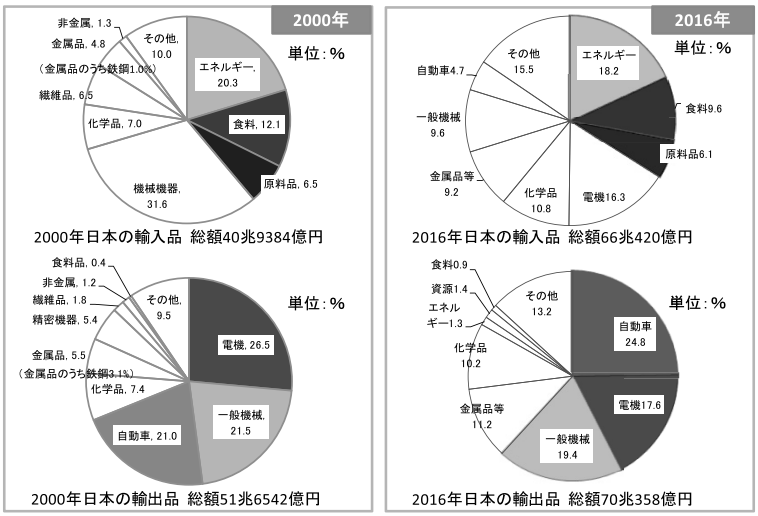


図１　日本の貿易収支．財務省統計[1)]に基づき作成．

*新日鐵住金㈱　顧問

学・電機・情報通信など各分野のお客様に対して，より優れた材質と品質を持つ鋼材を適切な価格で安定に供給する責任が製鉄業界にある．

2.2　鉄鋼業の位置づけ，課題と責任

現在，世界の鉄鋼市場は100兆円で年間16億tが生産されており，鉄鋼生産量はGDPと連動して増加し，生産量は2000年以降，年率平均5％で拡大している．また国内市場は10兆円で，毎年1億t強の鉄鋼製品が生産されている．金属製品の95％は鉄鋼であり，これが，鉄はベースメタルと呼ばれる所以である．物質・エネルギー収支の観点で見ると，国内鉄鋼業界は，日本国全体の総物質投入量15億tの22％，1次エネルギー供給量22EJの10％を使用し[2]，当社はその半分を使っていることから，当然，社会的な責任がある．1970年代のオイルショックを契機に，省エネルギー・省CO_2技術の技術開発を，業界を挙げて継続的に実行し，現在，世界最高レベルのエネルギー原単位で，鉄鋼製品の製造を実現している（図2）．鉄鋼製品はもちろん，省エネルギー技術自体も輸出し，地球規模のCO_2削減に貢献してきた．

今後も，一層の省資源・省CO_2製鉄技術開発，より付加価値の高い鉄鋼製品開発，お客様とのコラボレーションによる合理的なソリューション技術開発を進めることが，お客様のニーズにお応えし，且つ，社会的責任を果たす原点と考え，推進している．

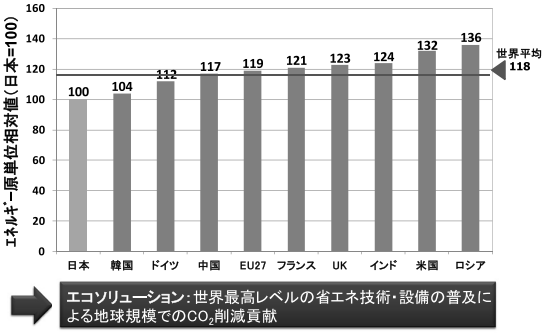


図2　粗鋼製造エネルギー原単位の国別比較．RITEの報告[3]に基づき作成．

3.　『3つのエコ』の視点で進める製鉄技術開発

鋼材製造エネルギーのうち8割を使う製銑工程の省エネルギー・生産性向上技術開発（エコプロセス）と，使用時の省エネルギーに貢献する軽量高強度鋼板ハイテンに代表される鋼材開発（エコプロダクツ®），および，鋼の持つ本来の機能を発揮させるための製鋼技術に関する技術開発の話題を述べる（図3）[4]．

3.1　エコプロセスの開発

製鉄プロセスの概要と製鉄所の全景を示す（図4）[5]．鉄鉱石原料と還元剤の石炭は全量海外から輸入し，製

図3　当社が取り組む『3つのエコ』[4]．

図4　製鉄所のレイアウト例[5]．

造した鉄鋼製品を海上輸送するため，臨海製鉄所の形態を取っている．高炉に上部から固体鉄鉱石と還元剤のコークスを層状に投入し，下部の羽口からO_2を富化した1200℃の加熱空気を高圧で送風する（図5）[6]．これにより高炉内下部でコークスが燃焼し，発生したCOガスが上昇し，鉄鉱石の加熱と還元が同時に進行する（(1)式～(5)式）．

$$C + 1/2O_2 \rightarrow CO \quad \cdots\cdots(1)$$
$$Fe_2O_3 + 1/3CO \rightarrow 2/3Fe_3O_4 + 1/3CO_2 \quad \cdots\cdots(2)$$
$$Fe_3O_4 + CO \rightarrow 3FeO + CO_2 \quad \cdots\cdots(3)$$
$$FeO + CO \rightarrow Fe + CO_2 \quad \cdots\cdots(4)$$
$$CO_2 + C \rightarrow 2CO \quad \cdots\cdots(5)$$

前述の通り，製銑工程だけで鋼材製造エネルギーの8割が必要になるため，生産性向上と省エネルギーの両立を目指し，1960年代から高炉の大型化技術開発を進め，内容積5000 m^{3}超の世界最大級の大型高炉を実用化してきた．現在，当社は5000 m^{3}以上の大型高炉を7基保有しており，これが製品の国際競争力のベースになっている．大型高炉は高さが100 m，直径が20 mあり，反応容器として人間が作った最大級のものと言われている（図6）[6]．高炉の内部は円筒形の空洞で，原料鉄鉱石粒子と還元剤コークス粒子の最適投入が安定操業の要である．直径が大きい大型高炉ほど安定操業の難易度が増す．そこで，最新のシミュレーション技術である粒子法による原料粒子散布や，気体・液体・固体の流動と伝熱とを連成した競合化学反応の3Dモデル化で，より高精度に炉内反応を研究している（図7～図9）[6~8]．また，当社が保有する13基の全ての高炉に温度と圧力センサーを多数点取り付け，1秒毎に計測してデータを採取解析している（図10）[9]．有意な知見を集積することで『見える化』を進め，本質に迫り，より高生産性と高安定な操業技術・設備技術の開発を行っているところである．

還元剤のコークス製造について，生産性を3倍にし，CO_2発生量の削減ができる次世代コークス炉「SCOPE21」の開発を1994年から2003年まで国家プロジェクトにより実行した．技術開発に成功し，2008年に当社大分製鉄所で1号機，2013年に名古屋製鉄所で2号機を稼働させた[10]．従来は，石炭粒子を100℃で8時間予熱し水分を蒸発させた後，1000℃まで10時間かけて加熱し合計18時間でコークスを製造していた．新技術により，常温から400℃まで30分で急速加熱し，その後，1000℃まで5時間強で加熱し合計6時間で製造可能である．急速加熱により3倍の生産性向上とCO_2削減はもちろん，石炭の微視的構造変化により粘結性が著しく向上し熱間強度が増して，高炉内の還元反応促進に好影響をもたらすことが分った．一人の高炉研究者の逆転の発想が開発の原点にあり，バブル崩壊による長期不況「鉄冷え」で鉄鋼業界が合理化の真只中にあった1994年に技術開発に着手し，景気回復後の2008年に実用化できたことは幸運であった．

還元剤として水素を利用しCO_2排出量を3割低減する革新的な環境調和型製鉄プロセス技術開発「COURSE50」が，国家プロジェクトとして開始した[11, 12]．鉄鉱石の水素還元は，CO還元よりも10～100倍速い[13]というメリットがある．一方で水素還元は吸熱反応で

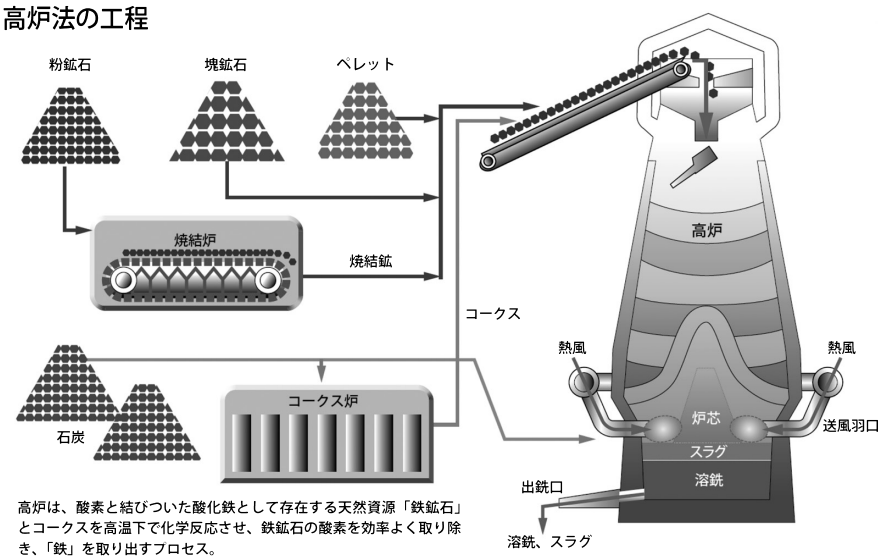


図5　鉄鉱石をコークスで還元し溶銑を作る高炉製銑工程[6]．

図6　世界最大級の大型高炉外観[6].

高炉は、円筒の鉄容器の内側に水冷パイプ内蔵の耐火物が貼ってある、シンプルな構造。

図7　高炉炉床から見上げた炉体内部[6].

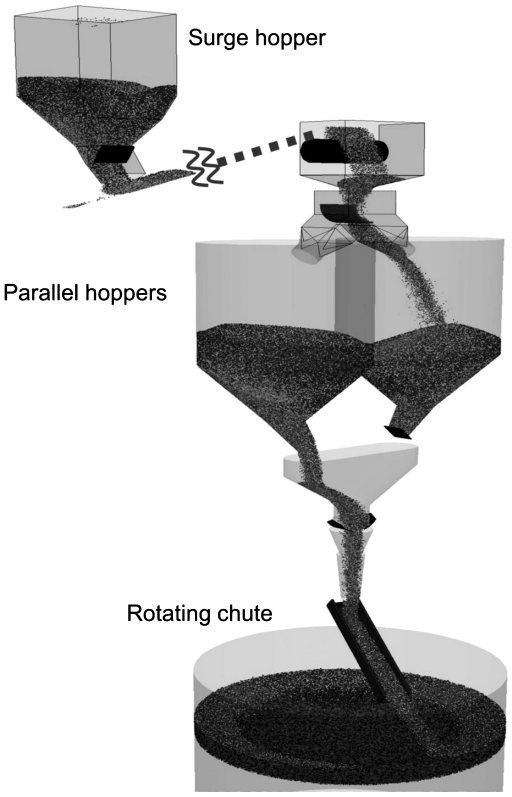


図8　高炉への原料投入シミュレーション[7].

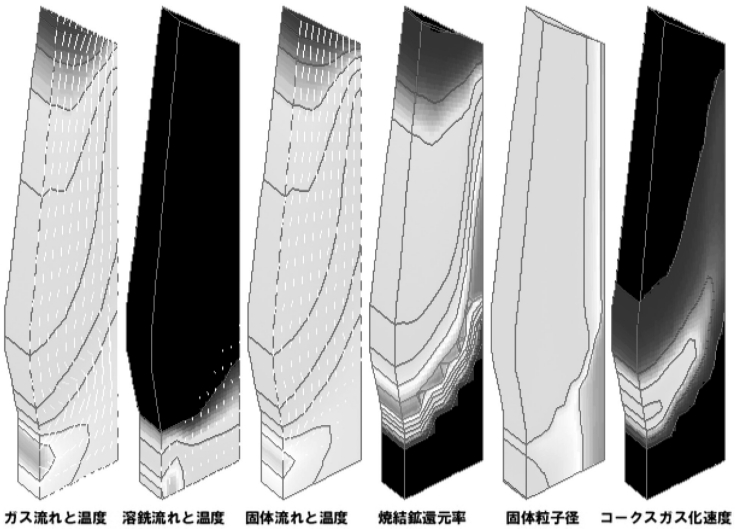


図9　高炉内化学反応の 3D モデル[8].

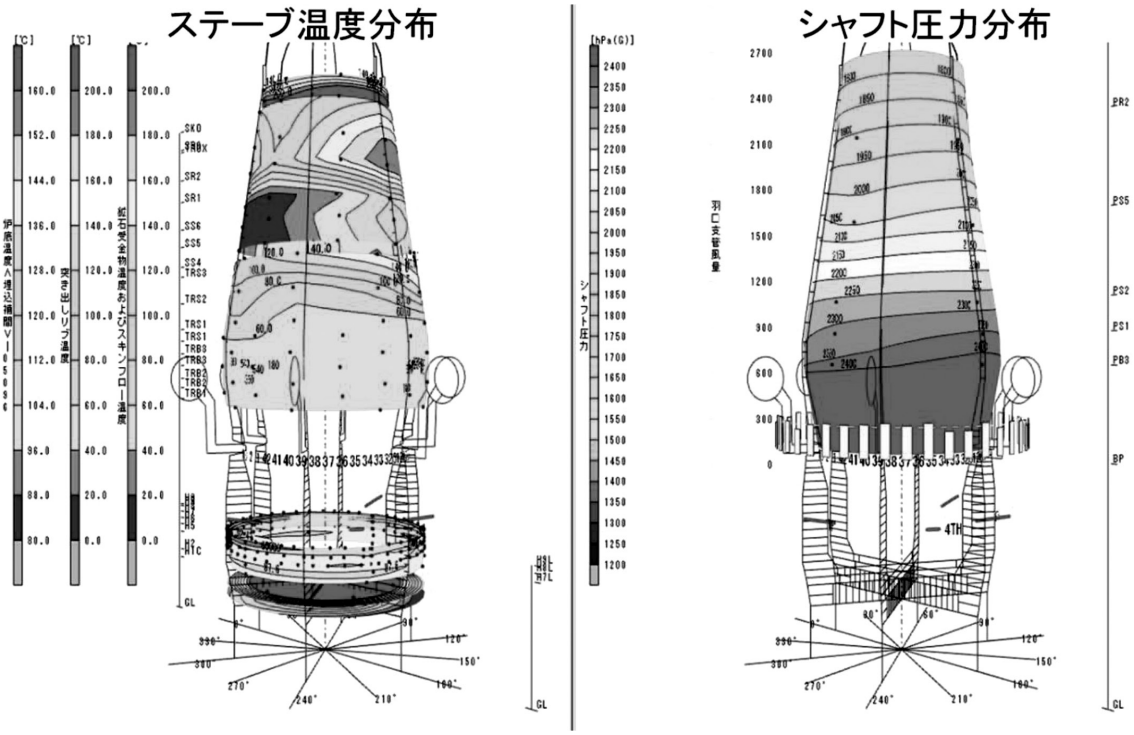


図10　高炉の温度，圧力のリアルタイム計測“3D-VENUS”[9].

あるため，大型高炉内部へのスムーズな熱供給が重要な技術課題である．相反する技術課題を新しい発想で克服する取組みが今なされている．

3.2　エコプロダクツ®の開発

自動車の燃費と衝突安全性を両立する軽くて強いハイテン薄鋼板の開発の一例を述べる．鉄鋼材料の性能をフルに発揮させるために，当社は自動車会社と車体設計の初期段階から協業し，合理的な材料設計とソリューション提案を行っている(図11[14]，図12[15])．例えば，最も優れたプレス成形性が要求される外板は，プレス時には柔らかく，塗装時に熱硬化（Bake-Hardening）するBH鋼板を開発した．さらに原子レベルでのメカニズム解明を進め，熱硬化は固体鉄中の格子欠陥への炭素原子の固着によることを世界で初めて実証した(図13，図14)[15, 16]．また，車体部材はもちろん，使用した鋼材そのものの衝突安全性を世界で最も正確に計測できる特殊な高速変形試験機を開発，これがISO化された．車体部品の成形加工時は柔らかく，車体衝突時には強度が増すという鋼材特性を明らかにし，より合理的な車体設計に貢献している(図15)[17]．

この他，厚鋼板・鋼管・棒鋼・線材など多品種に亘る鋼材開発により，4GPaまでの鋼材を実用化した(図16)[15]．鉄の理論強度は10～40GPaと言われており，さらなる高強度・高靭性鋼の開発と実用化に挑戦している．

3.3　鋼材の品質を決める製鋼技術

鋼が持つ本来の機能を発揮させるために，高強度鋼であるほど，不純物の除去と成分の均一性を高める必要がある．鋼材の品質を決める製鋼工程において，当社は，脱Si・脱Pの溶銑予備処理と脱C・昇温の2工程をシーケンシャルに同一転炉で行うMURC法を開発，実用化した(図17)[18]．本技術は，転炉の強撹拌機能の利用，シーケンシャル処理による溶湯の顕熱維持，および精錬スラグの熱間繰り返し使用が特徴で，CaOやMgOなど精錬剤の原単位削減と，環境負荷物質の蛍石（CaF_2）を一切不要にした高生産・高品質・環境調和精錬プロセスである．2次精錬ではAl脱酸と成分調整，真空処理による脱HとAl脱酸時に生成したアルミナ介在物の浮上分離除去を行い，清浄鋼を溶製する．次工程の連続鋳造では，鋳型内に設置した電磁撹拌あるいは電磁ブレーキにより，残留介在物量をさらに低減し，高生産性と製品鋼材の高品質を両立させている(図18)[19]．

しかし，現状には満足できない．今，このアルミナ介在物の絶対量の更なる低減と微細化に取り組んでいるところである．鋼材中のアルミナ介在物は，数μmサイズの粒子が凝集合体したものでアルミナクラスタ

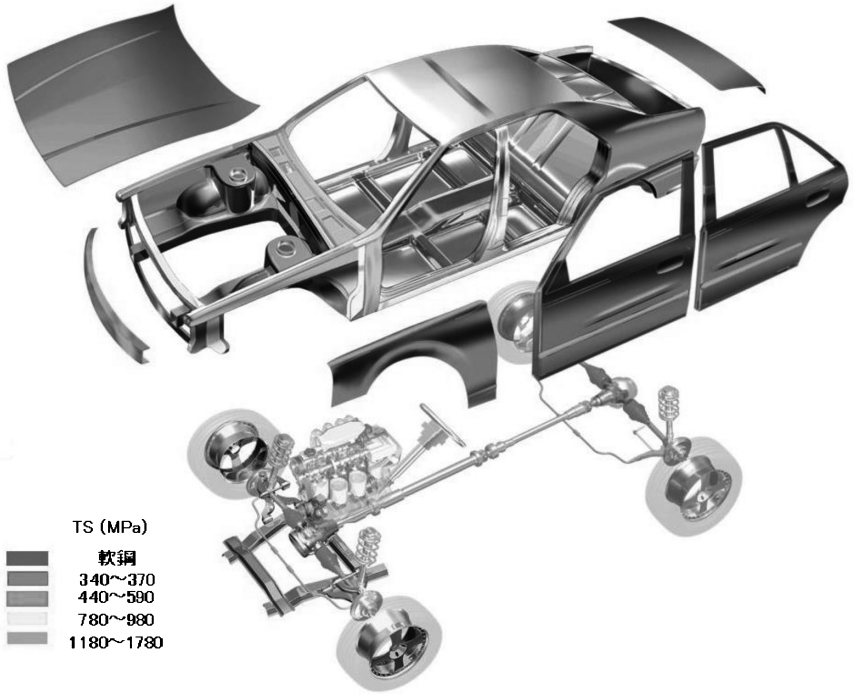


図11　軽くて強い自動車を作るための様々なハイテン薄鋼板[14].

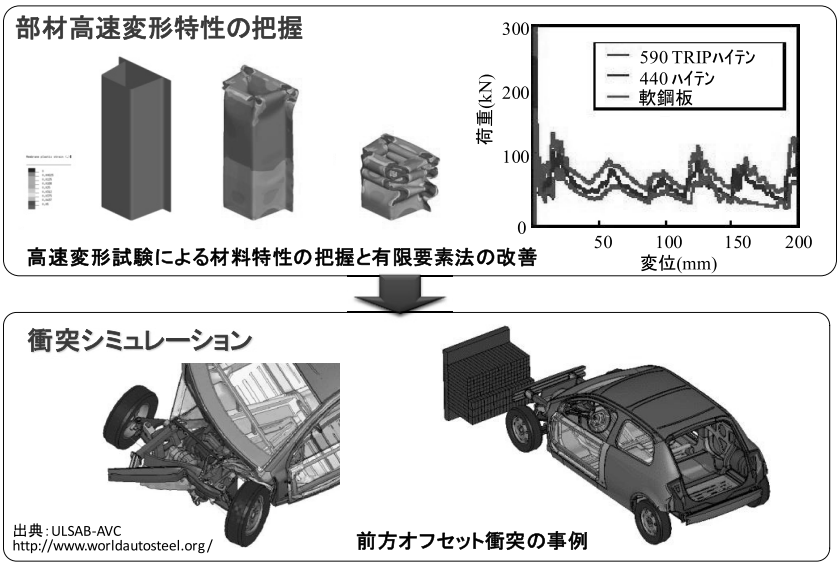


図12　車体衝突シミュレーションの事例[15].

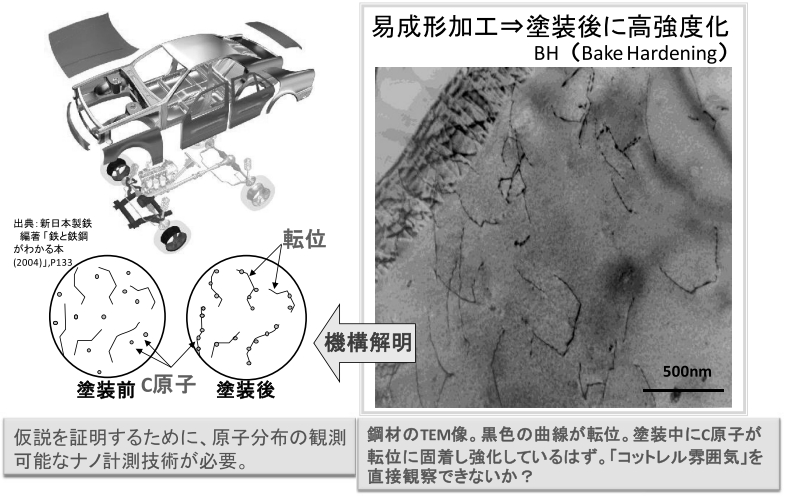


図13　易成形高強度の自動車外板用 BH 鋼板の開発[15]．プレス加工時に固体鉄中で移動増殖した格子欠陥の転位を，塗装焼付時の熱で炭素原子を拡散させて固着，外力が掛かったときの転位の移動を阻害し，鋼を強化した．

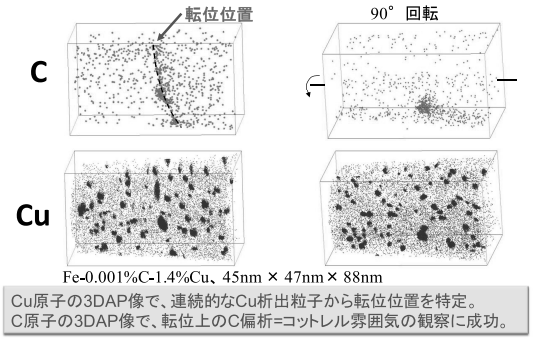


図14　固体鉄中の転位上への炭素原子固着現象「コットレル雰囲気」の直接観察．3D アトムプローブにより成功した[15, 16]．図中の破線が転位，緑の点が炭素原子で，転位上への炭素原子の集積固着が明瞭に分る．

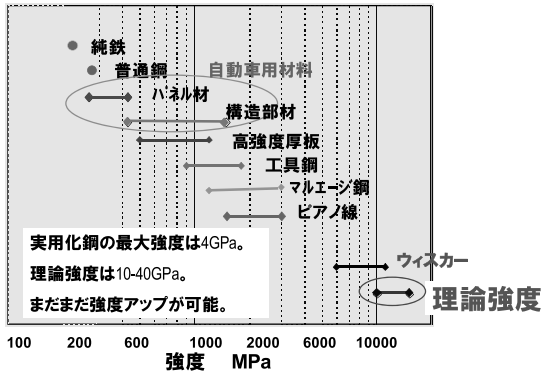


図16　鋼の理論強度と超高強度鋼への挑戦[15]．

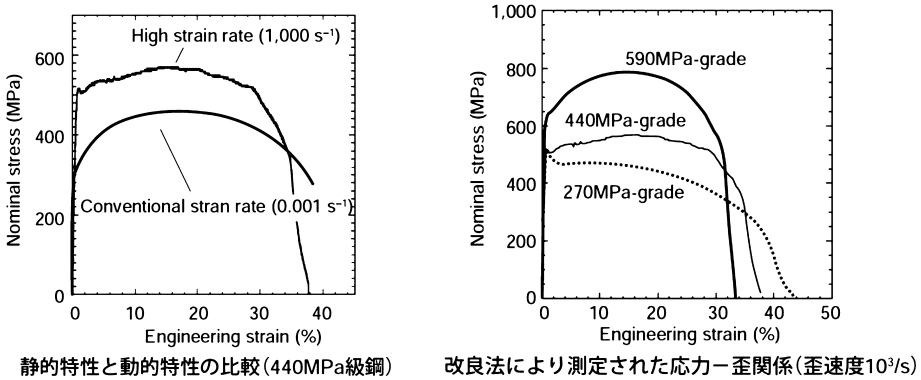


図15　車体衝突を模擬した高速変形下での応力歪曲線[17]．
世界最高精度の実測に成功した．

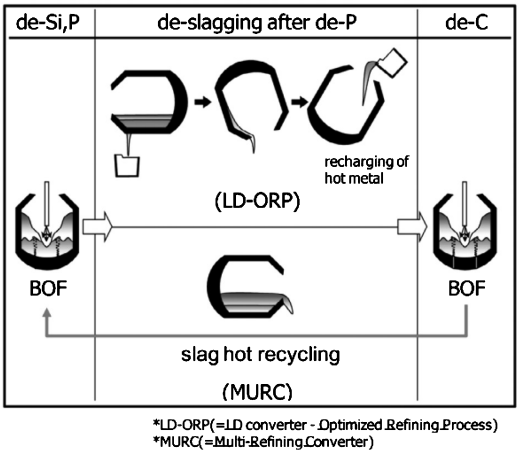


図17　精錬剤を熱間で繰り返し使用し，脱 Si，脱 P，脱 C を同一転炉でシーケンシャルに行う MURC 法の操業フロー[18].

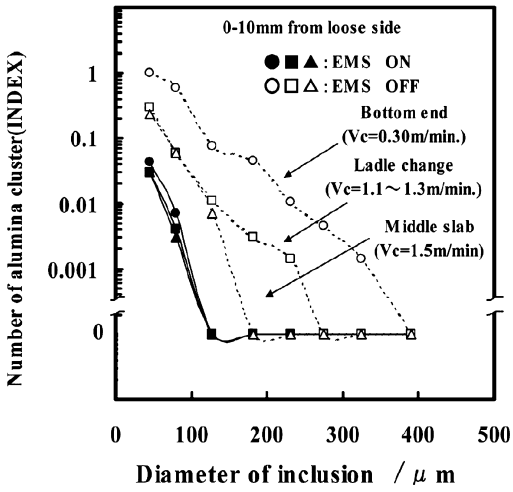


図18　連鋳鋳型内電磁撹拌による鋳片表層アルミナクラスター介在物の低減効果[19].

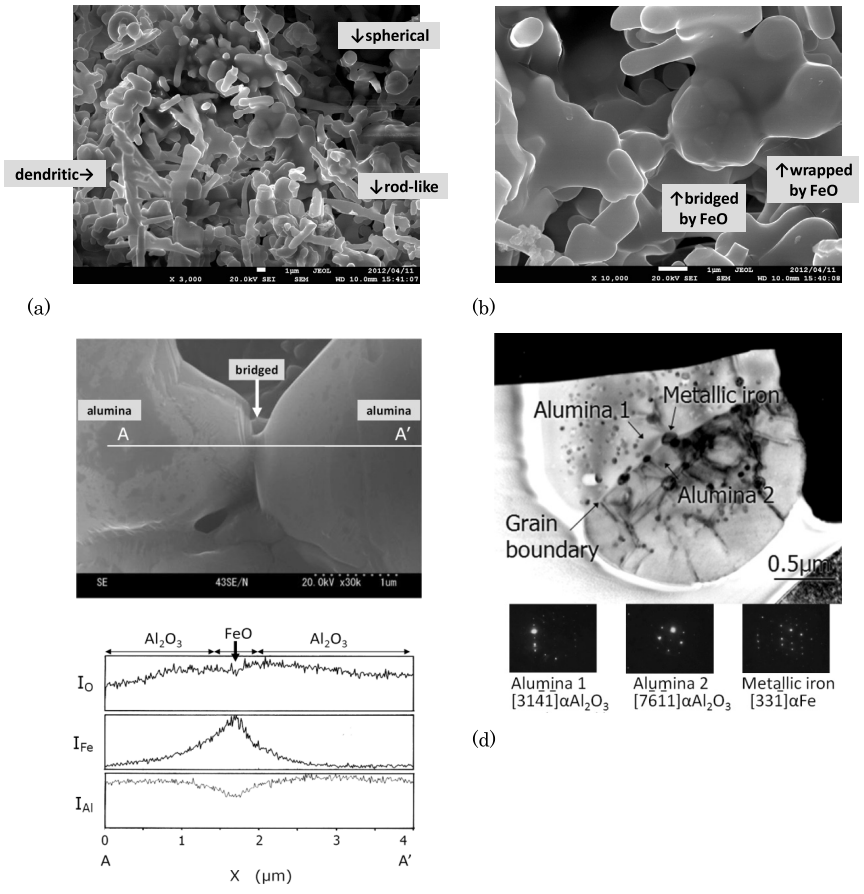


図19　溶鋼から採取したアルミナクラスターの外観 SEM 像（(a) 3 千倍，(b) 1 万倍），アルミナ粒子結合部の EPMA 線分析(c)，および，断面 TEM 像(d)[20]．図21の coagulating と sintering 段階の観察例．微量の酸化鉄が付着したアルミナ粒子間には 2～20 atm の液体架橋力が発生し，粒子同士が強力に結合しクラスター化していく．

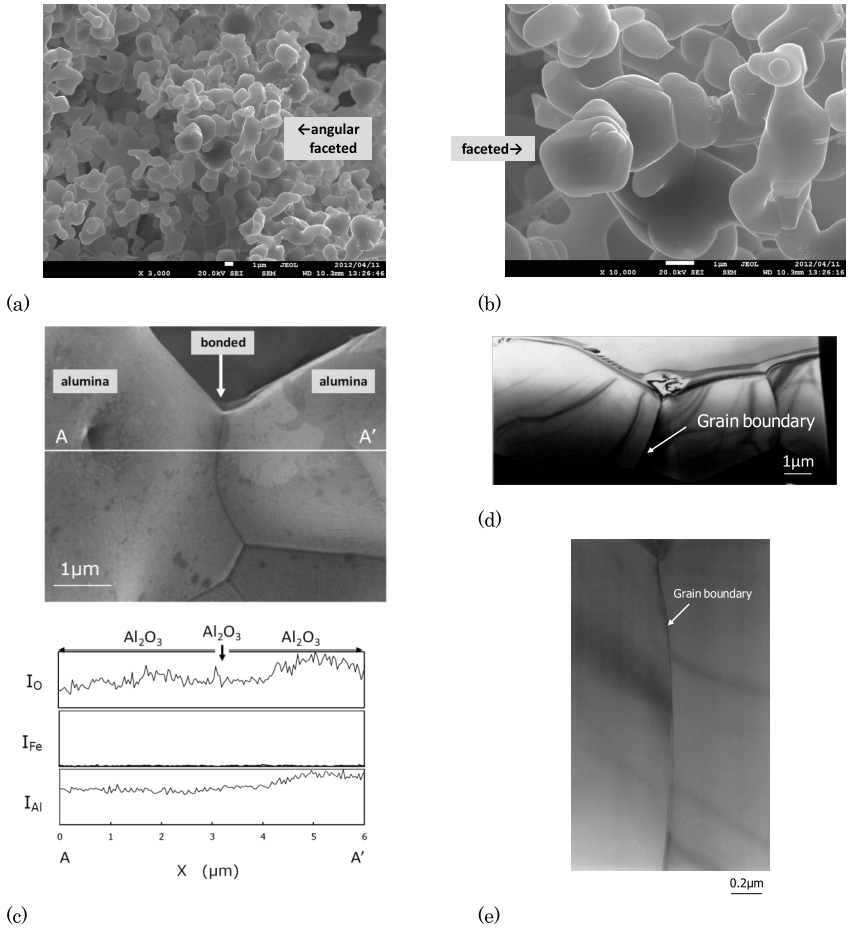
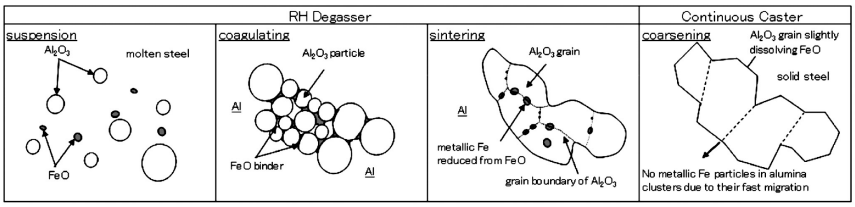


図20　連鋳鋳片から採取したアルミナクラスターの外観 SEM 像（(a) 3 千倍, (b) 1 万倍），アルミナ粒子結合部の EPMA 線分析(c)，および，断面 TEM 像（(d) 1 万倍，(e) 5 万倍）[20]．図21の coarsening 段階の観察例．鋳片ではアルミナ粒子間の酸化鉄は完全に還元消滅し，純粋アルミナの多結晶多孔質焼結体を呈する．



Steps	Chemical reactions and related phenomena
(i) Suspension	If high oxygen contamination >0.2%O or $P_{O_2}>10^{-9}$atm [35] occurs, Fe + O = FeO(l) ・・・・・・・・・・・・・ (1) 2Al + 3O = Al_2O_3(s) ・・・・・・・・・・・・ (2)
(ii) Coagulating	FeO works as a "binder" at the moment of collision.
(iii) Sintering	FeO is gradually reduced by Al in steel. 3FeO(l) + 2Al = 3Fe + Al_2O_3(s) ・・・・ (3)
(iv) Coarsening	Metallic Fe particles migrate to steel, and faceted planes develop on alumina surfaces to minimize interfacial energy.

図21　鋼中のアルミナクラスター生成機構[20]．

ーと呼ぶ．アルミナの融点は2050℃で，1600℃の溶鋼中では固体粒子であり，溶鋼中で衝突しても容易に合体しないはずである．何故いとも簡単にクラスター化するのか，合体を防止する方法は何か，長年の問題であった．そこで，実操業の種々の段階の溶鋼と連鋳鋳片からアルミナ介在物を採取し，表面と断面の詳細を高分解能SEMとTEMで観察した．観察の結果，合金原料投入時や取鍋からタンディシュへの溶鋼移し替え時の大気の巻込みなどで，局所的に溶鋼O濃度が0.2％以上，O_2分圧換算で10^{-9}atm以上に濃化したとき，固体アルミナと微量の液体酸化鉄が同時発生し，この液体酸化鉄が強力なバインダーとして作用して，アルミナ粒子同士が衝突した瞬間に2～20 atmの液体架橋力が生じ凝集合体が進行することが分った．Al脱酸溶鋼中で生成した酸化鉄は熱力学的に当然不安定で直ちに還元されていき，鋳造後は完全に消滅して純粋アルミナの多結晶多孔質焼結体となる一連のメカニズムが判明した(図19～図21)[20]．1960年代からアルミナ介在物のクラスター化機構の仮説が複数提案されてきたが，実操業が説明できず未確定のままであり先輩技術者を大いに悩ませてきたが，その原因はこの微量酸化鉄の変幻自在な振舞にあった．分ってしまうとより冷静に物事が見える．アルミナ介在物の断面TEM写真から，衝突合体前の個々のアルミナ粒子サイズは0.5 μm以下に見える(図19(d))[20]．理論値[21]とサイズのオーダーが一致しこの点も納得できる．液体酸化鉄の発生を防止すると，原理的にこのサイズまでアルミナ介在物は微細化できることになる．実操業での対策は溶鋼の酸素汚染防止であるが，メカニズムが確定できたのでより合理的な手段を追求している．

本解析では，鋼試料中の介在物を汚染なしに集めるコールドクルーシブル再溶解や，微小介在物のFIBによる精密切断，高分解能SEMとTEMによる分析など，調査解析技術の進歩と，分析研究者と熟練オペレーターの創意工夫に大いに助けられた．当たり前の話であるが『見える化技術』は，物事をきちんと理解するためのベースであり，継続的なブラッシュアップの重要性を改めて感じた次第である．高がちっぽけな介在物，されど大いに足を引っ張る介在物である．過去，実生産における溶鋼清浄度は，新しい要素技術開発の都度，ステップ状に改善がなされてきた(図22)[22]．新たな切り口を見出し次のステップを実現したい．

4．博士課程の研究活動，技術者としての原体験

「君は今日から何をするの？今日からは全部自分で考えて決めなさい．後輩の学生を2人預ける．彼らの卒業研究も考えてサポートしなさい．」昭和54年4月1日，鉄冶金学講座博士課程1回生になったその日，教授室へ呼びだされ恩師の盛利貞先生から，じっと眼を見て言われた．昨日までの先生とは何かが違うが，教授は絶対的である．知恵出しと実践の真剣勝負と感じた．小生の研究課題は，製鋼温度1600℃において，MoやWなど高融点金属を含む鉄合金のFe蒸気圧を正確に測り，化学反応の指標である活量を実測する計画であった．当時，これらの元素の溶鉄中の熱力学的物性値に関する情報は少なく，未知の事柄にトライで

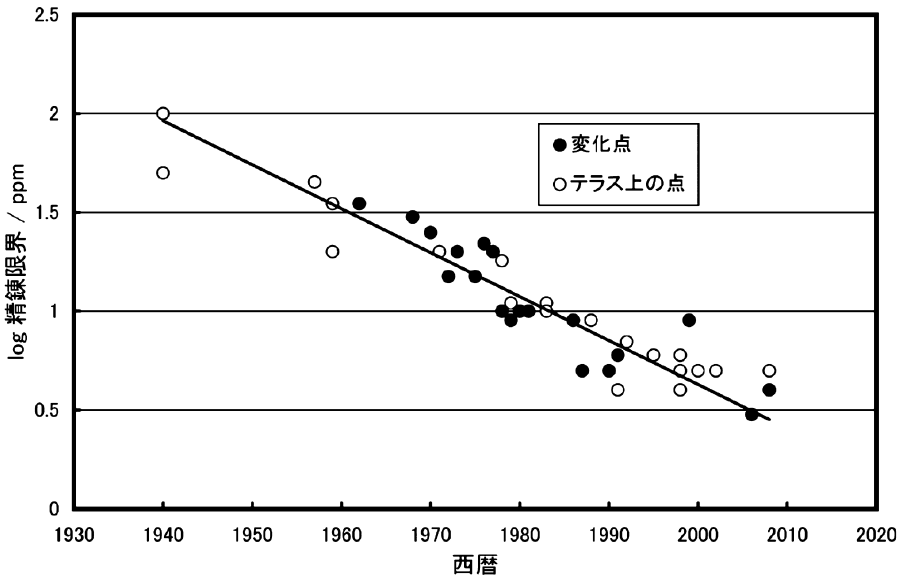


図22　実生産鋼におけるT.O濃度，溶鋼清浄化のトレンド[22]．

きること自体が喜びであった．実験手法は，鉄合金試料を1 cm 大のアルミナるつぼに入れて，10^{-7}Torr の高真空下で電子ビーム溶解し，るつぼの蓋に開けた細孔から取り出した蒸発 Fe 単原子の分子線をイオン化し，質量分析器により質量数56の Fe のイオン強度を測定して Fe の蒸気圧を決定するクヌーゼンセル質量分析法である（図23）[23]．一瀬英爾先生が分析装置を導入され，加熱炉は特注品であった．先生のご指導の下で先輩方の実験を手伝い一応のスキルを身につけたので，これならできると高を括っていた．ところが，いざフタを開けるとマトモに進まない．必要な温度1700 ℃ まで加熱できず，1300 ℃ くらいになると原因不明の絶縁破壊で突然装置は停止，高電圧電源の製造メーカーに依頼し詳細を点検したが電源自体には全く問題なく，原因不明であった．また，それまでのデータを見直すと，きちんとした結果を出すには，温度と蒸気圧の測定精度を10倍向上させることが必須であることも分った．

博士課程２回生の夏，依然として，正体不明の絶縁破壊で失敗の連続であった．グループの後輩には迷惑を掛けながら，なんとか外堀の仕事を編み出し形は作った．しかし，周囲からは当然進め方に疑問を持たれる．ご指導を頂いていた一瀬先生は北米に行かれ２年間ご不在で，自分で解決するしかない．開き直り，１つ１つ絶縁破壊の原因を徹底的に洗い出すことにした．７月と８月の２ヶ月間，１人で実験室にこもり集中した．電源自体は健全であったので，消耗品の交換以外は導入後そのままの加熱炉を全て分解点検することにした．必ず元に戻せるように，設計図を何度も読み詳細を理解してから慎重に分解作業に入り，実物の部品寸法と位置を設計図面と比較していった．タンタル製の熱電子遮蔽板を取りはずしたとき，遮蔽板の上部が熱変形で少し盛り上がっていることに気がついた．そこで，実測した全ての部品寸法を積み上げていったところ，電気的に絶縁している熱電子遮蔽板とアースを取った水冷筐体上部壁面との間隙が，わずか0.5 mm しかないことが分った．設計では５mm，コレだ！常温で試料をセットアップした時点ではこれでも絶縁は維持されるが，加熱したとき遮蔽板が熱膨張すると筐体に接触して絶縁破壊するのではないか，絶縁破壊で実験を中断し常温まで冷却すると再び自然に絶縁が復活する現象も，これで説明できる．はやる気持ちを抑えて，部品を作り直し交換した．加熱スタート・・，1300 ℃，1400 ℃，・・背中に汗が伝った・・，1700 ℃ まで昇温完了，全く問題なし！これで仕事ができるぞ，喜びで体が沸き立った．これだけの僅かな

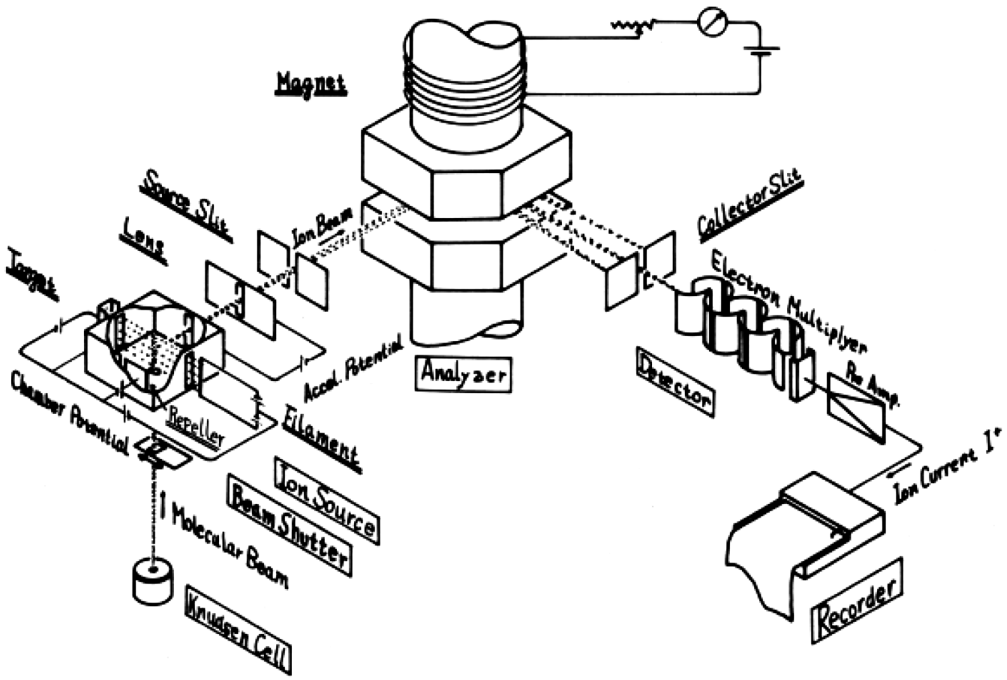
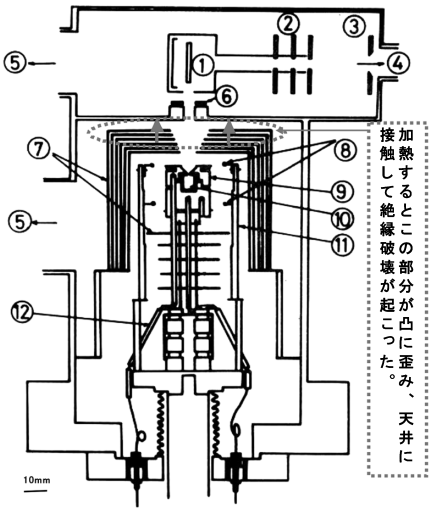


図23　実験装置全体図[23]．クヌーゼンセルに鉄試料を装入，高真空下で加熱，蒸発した Fe 原子をイオン化して，質量分析計により質量数56の Fe のイオン強度 I_{Fe} を測定．鉄合金と純鉄の I_{Fe} の比から Fe の活量を決定する．



①イオン源　②レンズ電極　③出射スリット　④分析管
⑤排気系　⑥分子流シャッター　⑦熱遮蔽板　⑧Wリングフィラメント
⑨セル容器　⑩クヌーゼンセル　⑪フィラメント支柱　⑫熱電対

図24　クヌーゼンセル加熱炉[23].

ことがなかなか見破れず，1年半の試行錯誤は随分長かったが，とにかく関門を突破した(図24)[23]．昨日まで，どうしようもなく難しいと感じていた問題も，一旦因果関係が分かれば，これ程あっけなく解決することがあるのか，とも思った．9月からは俄然勢いづき登り竜となった．温めたアイデアで精度改善と解析は一気に進んだ(図25，図26)[23, 24]．途中から，グループに冶金学科初の女子学生が入り，いささか力も入った(今の家内である)．

以上，本誌が母校の同窓会誌であることに甘え，40年近く前の私事，誠に小さな事件を申し上げて気恥ずかしい限りである．しかし，この一件で『その気になって，自分の頭で考えて行動して解決する大切さ』を思い知ることになり，小生には宝の原体験となった．今も状況は同じである．製鉄技術開発に携わる研究者として，若い世代と一緒に，気持ちを新たに目の前の仕事に取り組んでいるところである．

5. お　わ　り　に

当社製鉄技術開発の『3つのエコ』の視点と幾つかの具体的事例，および，技術者としての原体験となった博士課程の研究活動について申し上げました．若い方々のご参考になりましたら幸いです．

引　用　文　献

1)　財務省：http://www.customs.go.jp/toukei/info/tsdl.htm

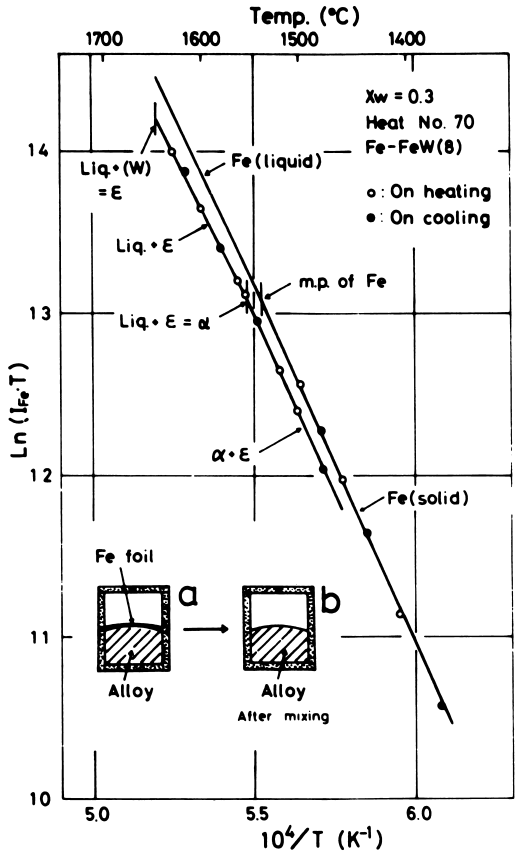


図25　実験結果の一例[23, 24]．鉄合金と純鉄のIFeの比から，1600℃における本試料のFeの活量を0.86と決定した．

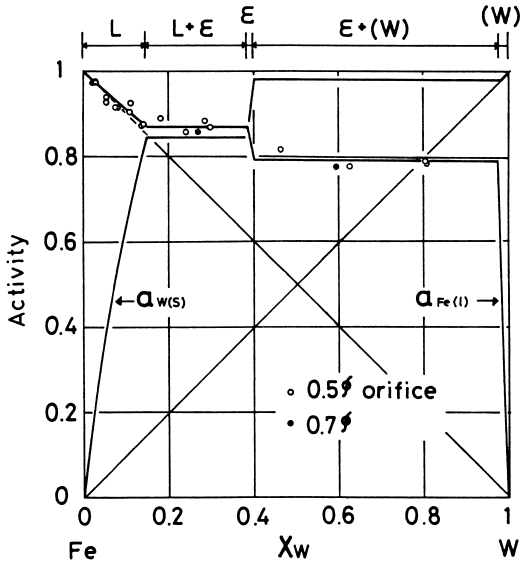


図26　完成した1600℃におけるFe-W合金の活量[23, 24]．実測したFeの活量から，Gibbs-Duhemの式を用いてWの活量を算出した．

2） 新日鐵住金:2012環境・社会報告書, (2012), p.27.
3） RITE：2010年時点のエネルギー効率の推計（鉄鋼部門), 平成24年 9 月24日.
4） 新日鐵住金：http://www.nssmc.com/csr/env/eco/index.html
5） 新日鐵住金：http://www.nssmc.com/works/kimitsu/about/visit.html
6） 新日鐵住金：http://www.nssmc.com/company/nssmc/science/08.html
7） 山村和人，松崎眞六，藤　健彦，山田　亘，中川淳一：新日鉄技報，391(2011), p.143.
8） 新日鐵住金：http://www.nssmc.com/tech/nssmc_tech/process/03.html
9） 高松信彦，栗原喜一郎，圃中朝夫，斎藤元治，加来久典：新日鉄技報，391(2011), p.79.
10） 新日鐵住金：http://www.nssmc.com/news/20130618_100.html
11） 日本鉄鋼連盟：http://www.jisf.or.jp/
12） 新日鐵住金：http://www.nssmc.com/csr/env/warming/future.html
13） 長坂徹也，萬谷志郎:鉄と鋼，78(1992), p.1753.
14） 新日鐵住金：http://www.nssmc.com/tech/nssmc_tech/car/car_01/index.html
15） 勝山憲夫：水曜会誌，24(2010), p.331.
16） 3D アトムプローブの解説例として, J. Takahashi, K. Kawakami and Y. Kobayashi : Mater. Sci. Eng. A, 535(2012), p.144.
17） 上西朗弘，吉田博司，栗山幸久，高橋　学：新日鉄技報，378(2003), p.21.
18） 熊倉政宣：新日鉄技報，394(2012), p.4.
19） 中島潤二，藤　健彦：新日鉄技報，394(2012), p.42.
20） T. Mizoguchi, Y. Ueshima, M. Sugiyama and K. Mizukami : ISIJ Int., 53(2013), p.639.
21） 佐野信雄，塩見純雄，松下幸雄：鉄と鋼, 51(1965), p.19.
22） 雀部　実：ふぇらむ, 15(2010), p.562.
23） 上島良之：京都大学博士論文 “クヌーゼンセル質量分析法による Fe-Mo および Fe-W 合金の熱力学的研究”, (1983).
24） 上島良之，山名　寿，杉山豊子，一瀬英爾：鉄と鋼, 70(1984), p.549.

大会記念講演

自動車用鋼板を取り巻く環境変化と研究課題

長　滝　康　伸*

Change in a Circumstance Surrounding Automotive Steel Sheets and Related Research Issues

by Yasunobu NAGATAKI

1. は　じ　め　に

自動車は，我が国にとって輸出額では最も大きな戦略商品であり，その競争力の維持強化は我が国の産業政策上においても重要性が極めて高い．本報告では，自動車に求められている社会的ニーズの変化と，これを支える自動車用鋼板に対する要求特性と鉄鋼メーカーにおける技術開発課題および今後の展望について述べる．

2. 自動車を取り巻く環境変化

自動車に求められる性能は，時代の流行に合致した魅力的なデザインやコンセプト，走行性能，燃費など，一般消費者の購買意欲に直接訴えかける品質が重要であることは言うまでもない．また，同時に，自動車業界を取り巻く環境変化に基づく国内あるいは国際的な法規制を満足させることが，工業製品として必要になる．後者については，第１次オイルショックを契機として1980年代に米国で制定された CAFÉ（Corporate Average Fuel Economy：企業平均燃費）規制に端を発し，近年では地球規模での温暖化抑制のための CO_2 排出抑制が，社会から求められる大きな要求事項となっている．このような社会的ニーズを満足させるために，自動車には優れた燃費が要求され，エンジンの燃焼効率の向上，走行時の摩擦ロスの低減などに加えて，車体の軽量化が，技術開発上重要となる．

図１は，自動車の燃費におよぼす車体重量の影響を示しており，CO_2 排出抑制に対して車体軽量化の効果

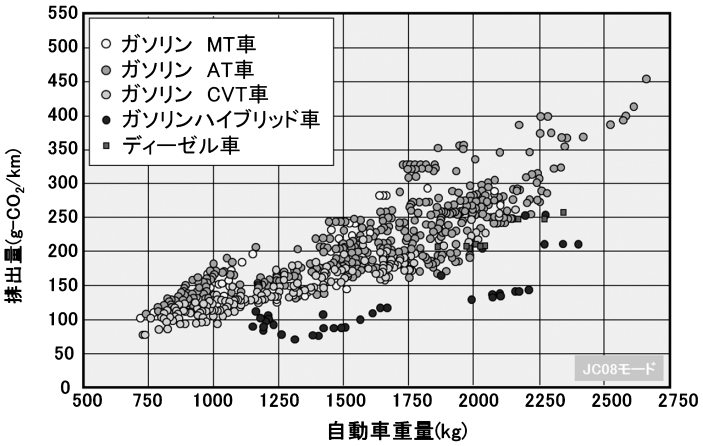


図１　CO_2 排出量におよぼす自動車車体重量の影響
（出典：国土交通省 HP）

*JFE スチール㈱　スチール研究所

が大きいことがわかる．自動車の CO_2 排出規制は，年々厳しくなっており，欧州では2015年までに CO_2 排出量 130 g/km を目標値としてきたが，2021年までには，さらに同排出量目標値を 95 g/km（24.5 km/L 相当）に厳格化している．このような CO_2 排出規制強化は，欧州において最も厳しいが，日米のみならず，中国他の新興国においても，当該目標値に追従する動きであり，全世界レベルで自動車の車体軽量化が当面大きな社会的ニーズとして継続していく．

自動車の車体骨格を構成する主要鋼材は厚さ 1〜2 mm の薄鋼板であるが，軽量化するにはこれらの厚みを薄くする必要がある．一方で，自動車乗員保護の観点より，衝突特性を維持させる必要がある．この衝突性能に関する法規制も，昨今，厳しくなっており，強靭で軽量な車体骨格が益々求められている．

3.　自動車用鋼板の超高強度化と研究課題

上述した強靭で軽量な車体骨格を実現するために，素材となる薄鋼板には，高い降伏強度・引張強度が求められる．鉄鋼材料は，自動車用薄鋼板でも採用されているように，意匠性が求められる外板に採用される軟質で良好な加工性を有する引張強度が 270 MPa 級から，車体骨格の強靭軽量化に有効な引張強度が 980 MPa を超える超高強度領域に至る強度範囲を網羅できる，工業的な適用性の極めて高い材料である．超高強度化には，オーステナイトからの急冷組織であるマルテンサイトやベイナイトといった硬質組織を活用する．硬質相の体積分率を上昇させることで素材強度を上昇させることが可能であるが，硬質相自体は，加工性に乏しいため，単純に体積率を上昇させただけでは，自動車の部品に成形させるために必要とされる成形能を付与することが難しくなる．

このため，図 2 に示すように，軟質なフェライトと硬質なマルテンサイトやベイナイトを複合させた DP 鋼（Dual Phase 鋼）や，残留オーステナイトの変態誘起塑性（Transformation Induced Plasticity）を活用した TRIP 鋼などのように，高強度と成形性を両立させた複合組織鋼板が開発されている．近年では，TRIP 効果の更なる活用による，第三世代ハイテン（3rd Generation HSS）の開発も進んでいる．

一方で，自動車は素材を部品に成形した後，溶接で組み上げ，塗装ラインで化成処理－電着処理－塗装焼き付けされる．このため，上記の強度と成形性の両立とともに，溶接性や塗装性を考慮した成分の適正化を同時に満足させる必要がある．また，外板や所謂ベルトライン下の車体下部に適用される部品には，高い防錆性能が要求されるため，溶融亜鉛めっき鋼板が採用される．しかし，強度を上昇させたり加工性の両立を図るために添加する Si や Mn 等の添加元素が増加すると，焼鈍中鋼板表面に Si や Mn 等の酸化物が形成されやすくなり，溶融亜鉛との濡れ性が低下しやすくなる．このため，成分適正化とともに，酸化物の形成を抑制するプロセス開発も必要である．鉄鋼メーカー各社では，成分の最適化に加えて，連続焼鈍設備あるいは連続溶融亜鉛めっき設備におけるプロセス条件の最適化により，引張強度が 980 MPa を越える超高強度鋼板を製品化している．

図 3 は，ここ10年の日本の鉄鋼メーカーにおける自動車用超高強度鋼板の開発・採用実績を各社からのプレスリリース記事より集約した図である．1180〜1470 MPa 級の冷延鋼板（CR : Cold-rolled steel sheets）・溶融亜鉛めっき鋼板（GA : Galvannealed steel sheets）が自動車の車体骨格に採用されるとともに，その強度レベルが，年々上昇していることがわかる．また，自

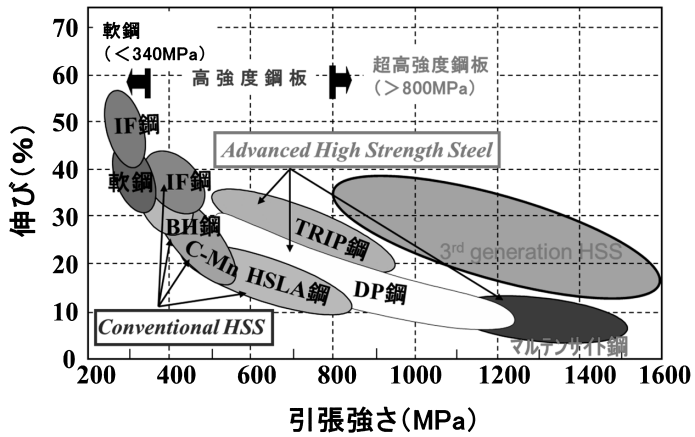


図２　自動車用先進鉄鋼材料の強度と伸びのバランス

動車メーカーや部品メーカーで素材を加熱して水冷した金型で焼き入れして高強度化するホットスタンプ素材（PHS : Press Hardening Steel）も実用化されており，1.8 GPa の高強度材が採用されている．至近では，超高強度鋼板の適用部品の拡大を背景として，高伸びタイプ（High El），高伸び－高穴広げタイプ（High El-λ）のように，加工性の高い商品も製品化あるいは実用化されている．

上述したように，CO_2排出規制，乗員の安全性確保の観点からの衝突性能への規制強化は当面続くものと予想され，超高強度材の適用範囲の拡大およびその強度上昇も継続するものと考えられる．一方で，種々の制約課題も多くなる自動車骨格への超高強度鋼板の採用拡大にともなって，素材の供給に留まらず，素材の塑性変形能に基づいた部品への成形時の成形限界の提言や部品成形精度向上あるいは成形方法の提案，溶接方法の提案など，鉄鋼メーカーの役割は拡大するとともに，研究課題も深化している．

4.　今後の展望と水曜会への期待

自動車を取り巻く環境変化の観点から，車体の強靭－軽量化への要求ニーズは，引き続き旺盛であり，日本の工業的戦略商品である自動車の競争力の維持・向上には，同ニーズに応える素材開発が極めて重要であ

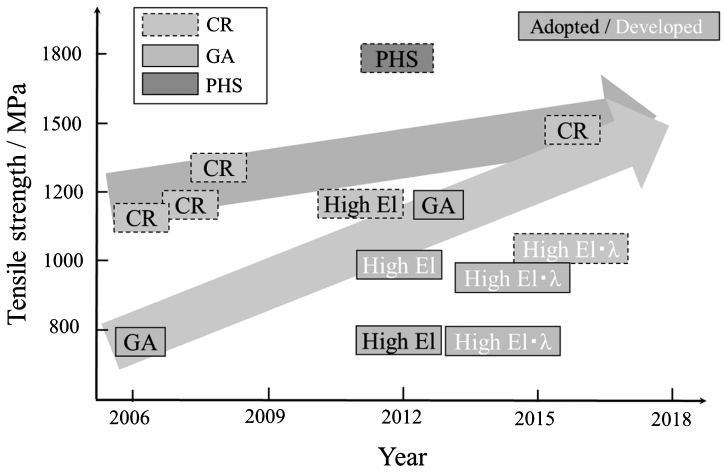


図3　日本における自動車用超高強度鋼板の開発・採用実績

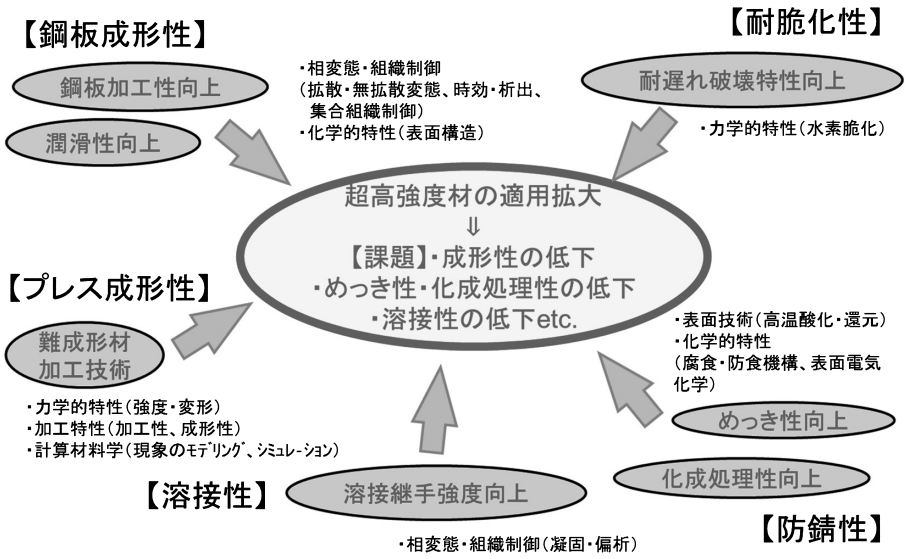


図4　研究課題と関連する学術キーワード

る．今後，自動車車体への超高強度鋼板の採用拡大と更なる高強度化が継続すると予想され，上述したように，技術課題も複雑・高度化していくと考えられる．その他，超高強度化の進展により，製造工程や腐食反応で車体に侵入する水素に起因した遅れ破壊に対する抑制技術や，非鉄軽量金属あるいは樹脂系素材との複合化で課題となる異種材料との接合技術やこれにともなう電食の課題も，今後，新たにクローズアップされてくると考えられる．

図 4 は，自動車用鋼板の超高強度化要求にともなう研究課題と，これに関わる学術キーワードをまとめた図である．小職は，1989年に同社に入社以来，自動車の軽量化に関する商品・技術開発に携わってきたが，社会ニーズの変化により，当該分野の研究課題は実に多岐に渡った分野へと変貌・成長してきたと痛感している．一方で，水曜会の卒業生が能力を発揮する場面は，非常に増えているとも考える．

水曜会には，引き続き，同分野の第一線で活躍できる人材の育成と供給を担ってほしいとともに，良い意味で横のつながりを深め，日本における技術革新を活性化する場としての機能も持てれば，より価値も高められるのではないかと考える．卒業生として，微力ながら貢献できればと考える次第である．

談　話　室

2014年4月から2016年3月までの鳥取大学での活動

奈　良　禎　太*

Activity in Tottori University from April 2014 to March 2016

by Yoshitaka NARA

1. は　じ　め　に

平成28年4月に社会基盤工学専攻資源工学講座地殻開発工学分野（石田毅教授）の准教授に着任しました奈良禎太（ならよしたか）と申します．水曜会誌への寄稿は今回が2回目となります．前回は，水曜会誌第24巻第5号に寄稿させていただきました[1]．

改めまして，これまでの経歴を述べさせていただきます．平成11年3月に北海道大学工学部資源開発工学科を卒業後，北海道大学大学院工学研究科環境資源工学専攻へ進学しました．平成16年3月に，金子勝比古教授（現・幌延地圏環境研究所 所長）のご指導の下，博士（工学）の学位を取得しました．その後，平成16年4月から平成20年3月まで北海道大学でポスドク研究員として在籍し，平成20年4月から平成23年3月まで日本学術振興会特別研究員（学振 PD）として北海道大学に所属しました．学振 PD として活動している際に，英国・ロンドン大学ユニバーシティ－カレッジに1年半ほど在籍しました．平成23年4月から平成26年3月までの3年間，京都大学大学院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に助教として在籍しました．この時初めて「京大資源」の一員となりました．またこの間，英国・ロンドン大学ユニバーシティ－カレッジや，米国・ミネソタ大学に2か月間滞在し，研究活動を行う機会を得ることができました．平成26年4月から平成28年3月までの2年間，鳥取大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻に准教授として在籍しました．その後，平成28年4月から，地殻開発工学分野に准教授として在籍することとなり，再度「京大資源」の一員として活動しています．

*京都大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻　准教授

前回の記事では，平成23年に京大資源に来るまでの研究内容を大まかにまとめさせていただきました[1]．今回は，鳥取大学に在籍した2年間について，特に所属部局，教育活動，研究活動に関してまとめようと思います．

2. 鳥取大学での所属部局

鳥取大学へは，教員公募に応募したことにより，移籍することとなりました．この公募の専門分野として，「地盤工学（岩盤工学を含む）分野」とあり，岩の力学に関する研究をしてきた私の得意分野とよく一致していると考え，応募しました．

前述した通り，鳥取大学では大学院工学研究科社会基盤工学専攻に所属しました．学部としては土木工学科（鳥大土木）での活動となりました．所属研究室は「土質工学研究室」でした．私の主な専門分野は岩の力学であり，研究でもそれらを中心に業績を残してきましたので，土質工学研究室への配属は意外でした．ただし，私が行う研究内容を土質工学的な内容に変更するというようなことは一切指示されず，研究を含め，自由に活動することができました．また，私が移籍した当時，鳥取大学土質工学研究室には教授はいませんでしたので，完全に独自で研究グループを運営するような形となりました．地方大学の場合，旧帝大よりも運営費がずっと少ないため，外部資金がなければ研究室の運営や研究活動が極めて大変なものになります．ただ，幸いにも科研費や他の競争的資金を獲得できていたため，金銭的に特に困ることなく研究室での活動を行うことができました．

前述の通り，一人で研究グループを動かしていたこともあり，鳥大土木での2年間は，自由気ままな活動ができました．学科内の用務もありましたが，大きな

仕事は無く，鳥大土木に所属する他の教員の方々には幸いにも親切に接していただけましたので，非常に楽しい期間を過ごすことができました．また，何よりも当時研究室に所属していた学生全員および秘書の方には感謝しなければなりません．研究を一生懸命頑張り，様々な活動に協力していただけました．

3. 鳥取大学での教育活動

続いて，鳥取大学で行った教育活動について述べたいと思います．特に，担当した授業と，研究室での教育に関して述べたいと思います．

授業ですが，学部では，「基礎力学および演習」「土質力学1および演習」「土質力学2および演習」「地盤工学」「岩盤力学」「建設工学設計」「環境建設工学」「土質力学実験」の計8科目を担当しました．これらの授業は，複数の教員で分担して担当しました．基本的に土質関係の講義を担当することが多かったのですが，岩の力学に関する内容も取り扱うことができました．授業にもよりますが，100人近くの受講生を相手に講義を行うことになりましたので，板書の際に字を大きく書くことには注意しました．本来当たり前に注意すべきことですが，大人数での講義となると，（特に積分の式や添字が必要な変数を書くときは）どこまで見えやすく書けたかが不安ではありました．それでも，多くの受講生はしっかりと単位を取得できており，必要な内容は何とか伝えることができたと思っております．2017年前期までで京大資源で担当した授業では，受講生の数は35人程度と，鳥大土木の時の1/3程度です．個人的には，これくらいの人数の方が授業をやりやすいと感じていますが，鳥取での大人数相手の講義もいい経験になったと思っています．

大学院では「岩盤物性論」というタイトルの講義を，修士課程の学生を対象に担当しました．内容としては，講義名にある通り，岩石・岩盤の力学物性に関する話題を中心に扱い，一部で鉱物学や物理化学に関する内容も扱いました．破壊力学や物理化学等は，学部では扱っていなかったようなので，大学院の講義とはいえ，なるべく専門的にし過ぎないよう，基礎的な内容のみを扱いました．学部では非常に多くの受講生を相手に講義を行っていましたが，大学院の授業では受講生数は15人程度でした．鳥大土木では，学部卒業後に企業へ就職する学生が非常に多く，修士課程の学生確保に苦労していました．ただ，少人数相手ということで，授業は極めてやりやすかった印象があります．学部の講義で居眠りしていたような学生が，大学院では積極的な姿勢で講義を受けているという場面をしばしば目にすることがありましたが，多少なりとも少人数での講義という影響があったようにも思います．

研究室では，初年度は3名でしたが，2年目には8名の学生の卒業論文または修士論文の面倒を見ました．個々に異なるテーマを与えるようにして研究を進めましたが，学生にとっては研究室配属前の講義ではほとんど習っていない内容の研究テーマとなるため，ほぼ毎週ゼミを行うようにして，基礎知識を増やしてもらうようにしました．また，実験装置や機器の取り扱いは，私が直接個々の学生に教える必要がありましたが，技術職員の方のサポートもあり，非常にスムーズに教えることができました．実験室の活動においては，技術職員の方のサポートは大変心強いものがありました．

鳥大土木では，卒論発表や修論発表の後，発表の内容や論文の出来栄えによって，「軽微な修正」「中規模の修正」「大規模の修正」「後日発表のやり直し」という判断が下されていました．学生にとってはなかなかシビアな環境での卒論・修論発表と思いました．幸いにも，私のグループの学生はよく頑張って研究と論文作成に取り組んでくれたこともあり，全員が「軽微な修正」で済みました．学生にとっては，学部でほとんど習っていない内容の研究テーマを与えられた中での卒論・修論への取り組みでしたので，大変だったと思うのですが，非常によく頑張ってくれたという印象があります．

4. 鳥取大学での研究活動

続いて，鳥取大学で取り組んだ研究について述べたいと思います．特に，本原稿を執筆している平成29年7月までに学術論文として掲載されたものを紹介したいと思います．

まずは，「大理石におけるき裂進展」に関する内容を紹介します[2]．この研究は，京大資源に助教として在籍していたときから続けていたもので，幸い鳥大土木でも装置を移動させて継続でき，Tectonophysics での掲載に至りました．

石造りの建築物の保全や露天掘り鉱山の残壁の長期安定性の確保を考える場合，岩石破壊の時間依存性に関する情報や知識の集積が必要です．そのため，岩石のサブクリティカルき裂進展（破壊靭性未満の応力拡大係数で生じる緩やかなき裂進展）[3]の研究が重要となります．珪酸塩岩石におけるサブクリティカルき裂進展に関する研究は広く行われてきましたが[3, 4]，炭酸塩岩石に関する研究は少なく，特に周辺環境が及ぼす影響は不明でした．そこで私の研究グループでは，岩石試料として構成鉱物が異なる2種の大理石を用い，サブクリティカルき裂進展に及ぼす周辺環境（温

度・相対湿度・水）の影響について調べました．特に，ドロマイト（$CaMg(CO_3)_2$）が主成分であるマケドニア共和国スコピエ産の大理石と，カルサイト（$CaCO_3$）が主成分であるイタリア共和国カラーラ産の大理石を用い，緩やかなき裂進展の測定を行いました．

試験方法として，定変位ダブルトーション試験法を用いました[5]．これは，応力拡大係数がき裂長に依存しないため，岩石のような不透明かつき裂長の正確な測定が不可能な材料で用いるのに大変好都合な試験方法です．図１に供試体の概要図と載荷形式を示します．このように，供試体の形状は長方形断面の薄板状となっています．また本研究では，周辺環境がき裂進展速度に及ぼす影響を明らかにするために，温度と湿度を制御した環境下で試験を行うこととしました．そのため，試験装置は恒温室の中に設置して測定を行いました．

図２および図３に，マケドニア大理石とカラーラ大理石における，温度一定で湿度が異なる大気中および水中で得られた応力拡大係数とき裂進展速度の関係をそれぞれ示します．これらの図より，温度一定の場合，同一の応力拡大係数でのき裂進展速度は，相対湿度が高くなるにつれて大きくなることがわかります．また，水中環境下で得られたき裂進展速度は，大気中で得られたものよりも高くなっていることが示されています．図４および図５に，マケドニア大理石とカラーラ大理石での，水中および相対湿度一定の大気中における，温度が異なる時の応力拡大係数とき裂進展速度の関係をそれぞれ示します．これらの図より，水中・大気中ともに，同一の応力拡大係数でのき裂進展速度は温度が上昇するにつれて高くなることがわかります．これらの結果より，大理石でのサブクリティカルき裂進展に及ぼす周辺環境の影響を明らかにすることができました．

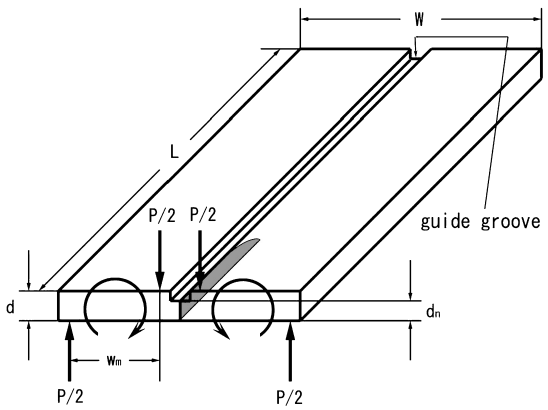


図１　ダブルトーション試験装置の概要図

また，本研究で得られた結果における特徴的なこととして，カラーラ大理石の大気中での試験結果おいて，き裂進展速度が高い領域でグラフの傾きが小さくなったことが挙げられます．特に，図５においてこの様子が良く示されています．これは，き裂先端への反応物質（水）の供給速度によってき裂進展速度が支配される第Ⅱ領域の出現と考えています[6]．強制乾燥時と含水飽和時の重量の差から求めたカラーラ大理石の空隙

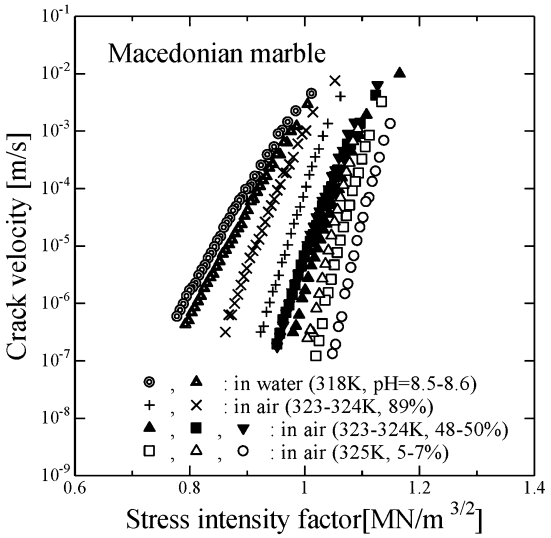


図２　マケドニア産大理石で得られたき裂進展速度と応力拡大係数の関係に及ぼす湿度および水の影響[2]

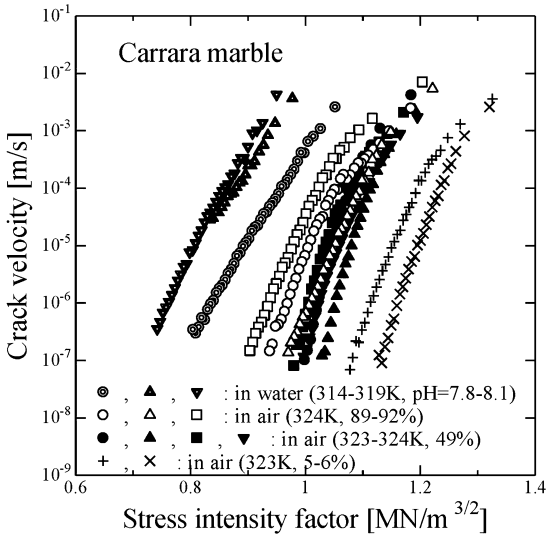


図３　カラーラ大理石で得られたき裂進展速度と応力拡大係数の関係に及ぼす湿度および水の影響[2]

率は0.2％と，通常の岩石よりも極めて低いものとなっています．したがって，カラーラ大理石の場合，岩石内に含まれる水の量が極めて少ないため，水が周辺大気中からき裂先端へ供給される速度にき裂進展速度が支配される第Ⅱ領域が現れたものと考えられます．一方，マケドニア大理石の空隙率は0.8％であり，岩石内に含まれる水の量はカラーラ大理石よりも多くなります．このため，マケドニア大理石では，周辺大気中のみならず，岩石内からき裂先端へ水が供給されることの影響も大きく現れるため，水の供給速度によってき裂進展速度が支配される第Ⅱ領域が現れなかったものと考えられます．

続いて，岩石の長期強度に及ぼす周辺環境の影響に関する研究結果[7]を紹介します．この研究のアイデアは鳥大土木在籍以前より持っていたものですが，データは全て鳥大土木在籍時に取得し，Engineering Fracture Mechanics に投稿しました．

岩石の長期強度を評価することは，岩盤の長期安定性を確保する上で極めて重要です．岩石の長期強度は，先に述べたサブクリティカルき裂進展の測定結果を基に評価することが可能ですが，これまでは，周辺環境が一定であることを条件として行われてきました[8, 9]．しかしながら，放射性廃棄物処分のような長期にわたる工学プロジェクトを考える場合，岩盤がさらされる周辺環境の変化を避けることは不可能です．ゆえに，岩石の長期強度を評価する上では，周辺環境の変化を考慮することは極めて重要と考えられます．そこで私の研究グループでは，大気および水中環境下において測定した岩石のサブクリティカルき裂進展の結果を基にして，特に周辺環境が変化する場合の長期強度を評価することにより，岩石がさらされる周辺環境条件の変化が長期強度に及ぼす影響について調べました．

図6に，大気中および水中で得られた，ジンバブエ・ハラレ産の斑レイ岩におけるサブクリティカルき裂進展におけるき裂進展速度と応力拡大係数の関係を示します．図より，大気中よりも水中において，き裂進展速度が高くなることがわかります．

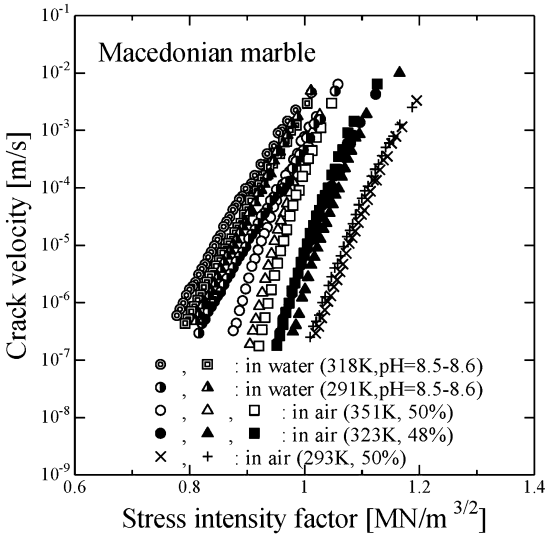


図4　マケドニア産大理石で得られたき裂進展速度と応力拡大係数の関係に及ぼす温度の影響[2)]

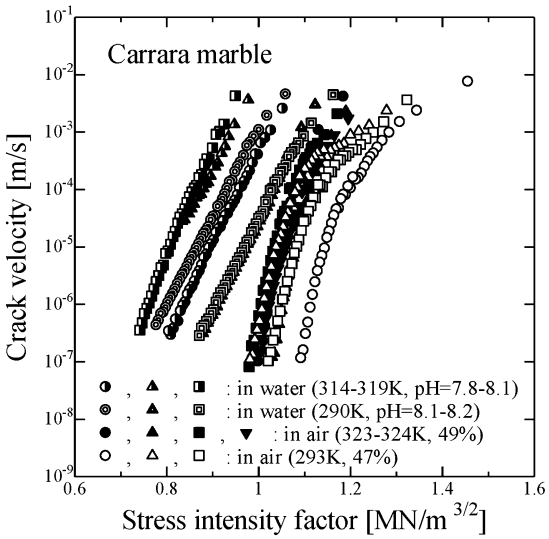


図5　カラーラ大理石で得られたき裂進展速度と応力拡大係数の関係に及ぼす温度の影響[2)]

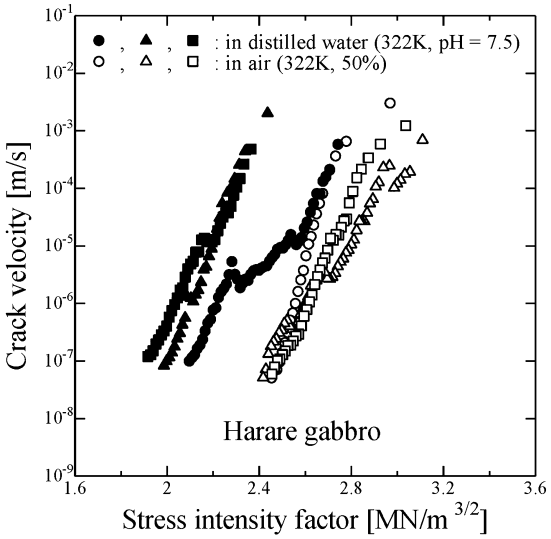


図6　ジンバブエ産斑レイ岩で得られたき裂進展速度と応力拡大係数の関係[7)]

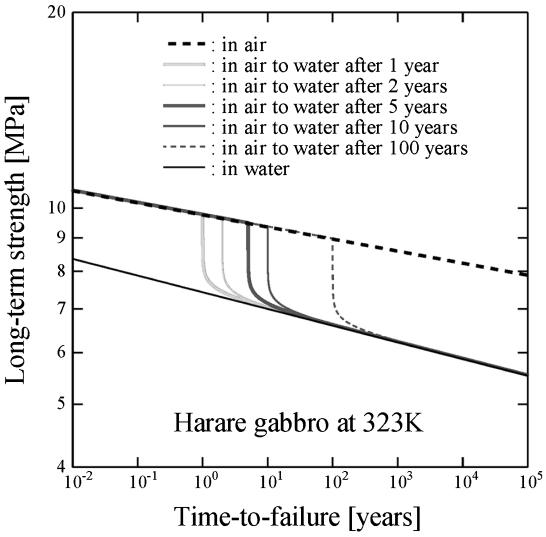


図７　ジンバブエ産斑レイ岩における長期強度[7)]

図７に，周辺環境が大気から水中に変化する場合の長期強度評価結果を示します．図より，周辺環境が大気から水中に変化する場合，岩石の長期強度は顕著に低下し，すぐに水中一定環境下での長期強度の値に収束することが示されています．これより，大気から水中へ周辺環境が変化した後の長期強度は，急激に低下した後，水中環境下での長期強度に収束すると結論付けられます．これは，水の存在がき裂進展の促進に大きく影響するためと考えています．したがって，岩石の長期強度の上昇には，周辺環境からの水の流入を抑制することが重要であると考えています．また，岩盤の長期の利用を考える際には，水中環境下での長期強度評価が極めて重要であると考えています．

5. お　わ　り　に

鳥取大学の在籍期間は２年間と非常に短いものではありましたが，異なる分野での活動は非常に新鮮なものでした．教員や事務職員の方々には非常に親切に接していただき，私個人としては大変居心地の良い２年間でした．また，学生諸氏との出会いや研究活動は，大変有意義なものとなりました．特に，一生懸命頑張る姿勢に感銘を受けました．教員という立場ではあったものの，学生からは非常に多くのことを学ぶことができたように感じています．今後は京都大学で活動することになりますが，鳥取大学での経験を生かして頑張りたいと考えています．

参　考　文　献

1）奈良禎太：水曜会誌, **24**(2012), 585-589.
2）Y. Nara, K. Kashiwaya, Y. Nishida and T. Ii: Tectonophysics, **706/707**(2017), 116-128.
3）B. K. Atkinson: J. Geophys. Res., **89**(1984), 4077-4114.
4）奈良禎太：Journal of MMIJ, **123**(2007), 2-9.
5）D. P. Williams and A. G. Evans: J. Test. Eval., **1**(1973), 264-270.
6）B. Lawn: *Fracture of Brittle Solids – Second Edition*, Cambridge University Press (1993).
7）Y. Nara, M. Tanaka and T. Harui: Eng. Fract. Mech., **178**(2017), 201-211.
8）Y. Nara, M. Takada, D. Mori, H. Owada, T. Yoneda and K. Kaneko: Int. J. Fract., **164**(2010), 57-71.
9）Y. Nara, H. Yamanaka, Y. Oe and K. Kaneko: Geophys. J. Int., **193**(2013), 47-60.

談　話　室

蛍光X線スペクトル強度に影響を及ぼす因子の検討：合金中微量元素分析の高精度化を目指して

田　中　亮　平*

Influential Factors on the X-ray Fluorescence Intensity: For Trace Elemental Analysis with High Quantitative Accuracy

by Ryohei TANAKA

1. はじめに

平成29年4月付けで，材料工学専攻物質情報工学分野（河合潤教授）の助教に着任いたしました田中亮平と申します．経歴を簡単に述べますと，平成24年に京都大学工学部物理工学科を卒業後，京都大学大学院工学研究科材料工学専攻に進学，物質情報工学研究室にて河合潤教授の指導を受け，平成29年3月に『X線分光と第一原理計算による合金中微量元素分析の基礎研究』と題する論文により博士（工学）の学位を取得しました．博士後期課程では分光分析および計算材料学に立脚し，金属材料中に含まれる微量元素の定量分析精度に関する研究を行ってまいりました．この場をお借りして，最近の研究成果および今後の展望について蛍光X線定量分析の高精度化のための基礎研究に関する内容に絞って紹介させていただきたいと思います．

2. エネルギー分散蛍光X線スペクトル中の偽ピーク強度

蛍光X線分析やSEM-EDX分析の測定スペクトルにおいて，X線光子数・検出器の形状・サイズ・配置に起因して，試料中に含まれる元素の特性X線以外の種々のピークが観測され，試料中に含まれる微量元素の定量分析精度に影響を及ぼすことがあります．私の研究では，スペクトル中に生じる特性X線以外のピーク（偽ピークと呼ぶことにします）の強度に関する解析を行いました．

まず，エネルギー分散蛍光X線スペクトル中に観測される偽ピークであるサムピーク・エスケープピーク・回折ピークの3つのピークについて説明します．

*京都大学大学院工学研究科物質情報工学専攻　助教

2つの光子が時間分解能以下の時間でX線検出器内に入射したとき，回路は2つの光子を区別することはできず，それらを一つのパルスとして検出し，そのときピークは2つの光子のエネルギーを足し合わせた場所に観測されることになります．このように観測されるピークをサムピークと呼びます．X線光子がシリコン検出器と相互作用すると，Si原子を励起し，検出器内で特性X線が発生します．この特性X線が，試料由来の蛍光X線の代わりに検出器から出射されると，X線スペクトル内に，主ピークからSi Kα線のエネルギー（1.74 keV）分だけ低エネルギー側にX線スペクトルが観測されます．このピークはエスケープピークと呼ばれます．回折ピークは単結晶によって回折されたX線が検出器に侵入したときに観測され，大きな単結晶を用いるときは回折ピークの発生に注意が必要となります．サムピーク・エスケープピーク・回折ピーク，これらの偽ピークの強度は測定条件に依存し，ときとして無視できなくなるほど大きくなります．そのためエネルギー分散型蛍光X線分析装置を用いた測定においては管電圧などパラメータの調整に特に注意を払う必要があります．

図1にGe単結晶の蛍光X線スペクトルを示します[1]．測定はHoriba XGT 7200により，Rhアノード X線管，2本の単細管X線導波路（スポットサイズ1.2 μmと50 μm），SDD検出器を用いたものです．X線管電圧および電流はそれぞれ(a)15 kV, 380 μA, (b)50 kV, 15 μAに設定し，測定時間は600 sです．(a)においては，回折ピークとGe Kα（例えば，Ge Kα+DP1）線によるサムピークが確認できます．(b)50 kVスペクトルはバックグラウンドが大きく，これらのサムピークは観測できません．このように，測定スペクトル中には特性X線によるサムピークだけでなく，偽ピークに

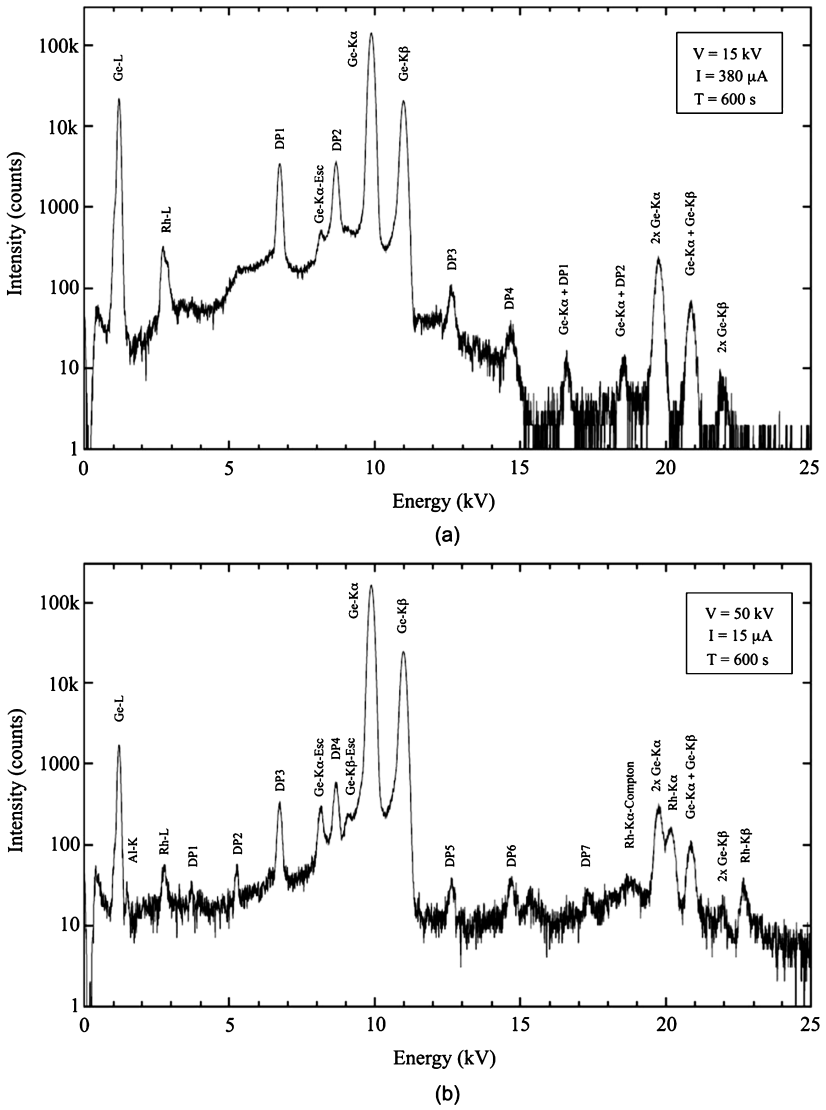


図 1　Ge 単結晶の蛍光 X 線スペクトル．X 線源は Rh アノード X 線管．加速電圧は（a）15 kV and（b）50 kV. DP, Esc, “＋”はそれぞれ回折ピーク，エスケープピーク，サムピークを表しています．

よるサムピークも観測されることが確認できます．偽ピークが定量精度に影響を及ぼす他の例として，鉄中の微量有害元素測定が挙げられます．鉛とヒ素の混合物の分析を行うとき，Pb Lα 線（10.55 keV）は As Kα 線（10.54 keV）とピーク位置が重複しますので，鉛の測定のためには Pb Lβ 線（12.61 keV）が代用されます．他方，Pb Lβ 線のエネルギーはFe Kα 線（6.40 keV）のエネルギーの約 2 倍であり，Fe Kα 線のサムピークは Pb Lβ 線と重複することになります．したがって，土壌堆積物測定のような鉄マトリックス中の微量の鉛やヒ素の高精度定量分析を行うことは，偽ピークの存在により困難となります．

このように，エネルギー分散蛍光 X 線スペクトル中に観測される偽ピークは X 線分析の定量精度に影響を及ぼしますが，それらの強度に関して定量的な議論は充分には行われていません．そこで，エネルギー分散型蛍光 X 線分析において観測される偽ピークの強度をあらわす式を装置分解能や計数率の関数として求め，その有効性を計算機シミュレーションに基づき検証を行いました．サムピーク強度と入射 X 線強度との関係性を理解するために，個々のパルスが検出器に侵入してくる簡単なモデルを考え，装置の時間分解能と入射 X 線強度の関数としてサムピーク強度の算出を行いました．入射してくるパルスはデルタ関数で

あると仮定し，その数を c とします．図2に示すように，r を検出器の分解能として，1 sec. を $1/r$ に等分します．等分された時間間隔を1つの容器とみなし，その容器の中に複数のパルスが捉えられると考えます．n 次のピーク（$n=0$ はパイルアップすることなく観測されたパルス強度，$n>1$ はサムピークに相当する）の強度 I_n は，幅 $1/r$ の容器にランダムに捉えられたパルスを見出す確率に比例することになります．すなわち

$$P(n) = A^{-1} \bullet {}_cC_n \bullet r^n (1-r)^{c-n}$$

で表されます．ここで，${}_cC_n$ は組み合わせ，すなわち c から n 個を順序関係なく選び出す場合の数です．A は規格化定数であり，次式のようになります．

$$A = \sum_{n=0}^{c} {}_cC_n \bullet r^n (1-r)^{c-n}$$

これより m 次のピーク強度 I_{m+1} は，

$$\frac{I_{m+1}}{I_1} = \frac{P_{m+1}}{P_1} = \frac{{}_cC_{m+1} \bullet r^{m+1} \bullet (1-r)^{c-m-1}}{{}_cC_1 \bullet r \bullet (1-r)^{c-1}} \approx \frac{(c \bullet r)^m}{(m+1)!}$$

となります．ここで $c \gg 1$, $c \gg m$, $r \ll 1$ としました．この式から m 次のサムピーク強度 I_m は，単位時間あたりに検出器に入ったパルス数の m 乗に比例することがわかります．

上記の解析式の有効性を検証するため，数値シミュレーションを合わせて行いました．r 秒間に q 個のパルスが検出された時，それらは全てパイルアップしているとみなします．すなわち，q 倍の強度をもつ1つのパルスが検出されたのと同じであるとします．1秒間に発生する入射X線の光子数 c を 10^2, 10^3, 10^4, 10^5, 10^6 とし，$r = 2.5, 5.0\ \mu$s としたときのカウントされるパルスのヒストグラムを作成しました．得られた強度分布を図3に示します．c が大きくなるにつれ，サムピーク強度は増大することがわかります．例えばこれは主元素の含有量が多い，もしくは入射X線強度が大きい場合に相当します．$r = 2.5, 5.0\ \mu$s において主ピーク強度はすべてのパルスが主ピークとしてカウントされた場合を100％として，それぞれ90.6％と82.3％となり，これらの値は文献と良い一致を示しました[2) 3)]．また，図4に示したように，m 次のサムピーク強度と主ピーク強度の比は c^m に比例することがわかります．これに関しても，SiO_2 に Cu 陰イオンを照射したときに生じるX線スペクトルにおける弱ピーク強度に関する先行研究[4)]と一致する結果が得られました．

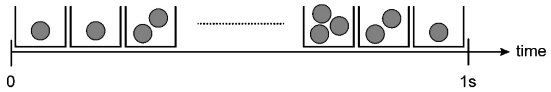


図2　時間分解能 r を有する検出器に対するパルスの入射モデル．ひとつの球がひとつのパルスに相当します．

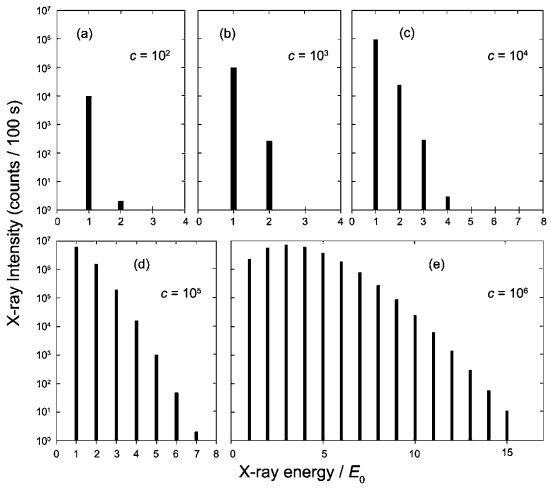


図3　(a) 10^2 (b) 10^3 (c) 10^4 (d) 10^5 (e) 10^6 cps（counts per seccond）でパルスを入射したときのX線強度分布．cps が大きくなるにつれ（主元素の含有量が多い，もしくは入射X線強度が大きい場合に相当），高次のサムピーク強度が増大します．

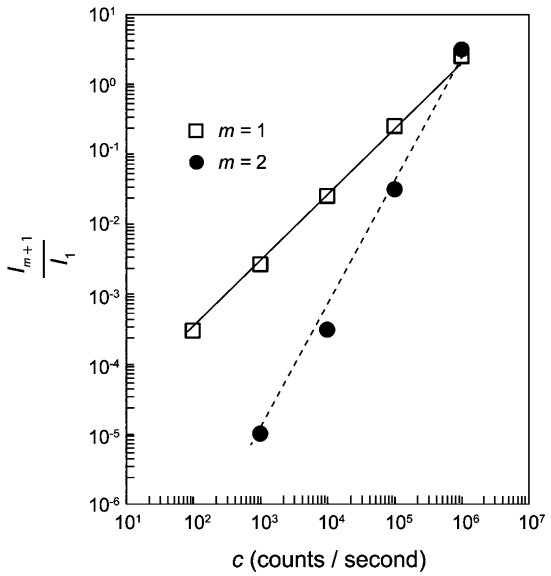


図4　主ピークと m 次のサムピーク強度比と入射パルス数との関係．

このように，偽ピーク強度を入射パルスと時間分解能に関する解析式として表すことで，スペクトル中に観測される偽のピークを避け，試料中微量元素の高精度定量分析を行うためには，検出器の時間分解能・X線管電圧電流は低く設定しなければならず，計数率を意図的に抑えるなどの工夫が必要となることが簡便にわかります．

3．偏光光学系における蛍光X線理論強度

3次元偏光光学系を用いた蛍光X線分析は，スペクトル中の散乱線強度を著しく低減することが可能であり，微量元素の高感度分析方法として利用されています．偏光蛍光X線を得る方法として（i）散乱現象（ii）Bragg反射（iii）シンクロトロン放射光を用いた方法が考案されています．（i）について，Ryon[5]，Markowicz[6]によると，散乱を利用した3次元偏光光学系蛍光X線分析は1973年 Young らにより考案され[7]，その後1974年 Dzubay らが Mo ターゲットX線管，偏光子に炭素を用い入射X線を散乱させて生じた偏光X線を用いることで高い S/N 比を実現しました[8]．ただし，このように軽元素を偏光子として用いた場合，偏光X線の強度が弱く，S/N 比が向上する一方で計数率が低くなるということが指摘されています．（ii）について，図5のようにX線が偏光子に対し45度で入射するよう配置し，Bragg反射により x 軸方向に偏光させることで高強度の単色偏光X線を得ることができます．1963年に Champion らが偏光子にトパーズ単結晶を用いて[9]，1976年に Aiginger らが Cu ターゲットX線管，偏光子に Cu 単結晶（$2d = 2.18$ Å）を用いて，原子番号29以下の元素分析にこの手法を適用しました[10]．これらの偏光子を用いた方法は，吸収の影響や用いる結晶の格子面間隔の制限により適用できるエネルギー幅が制限されます．そこで，図5と同様の3次元配置において偏光子の部分に2次ターゲットを配置することで，偏光度は低くなるものの測定元素に応じたX線を発生させるとともにバックグラウンドを低減する手法も考案されています[11]．これらの方法に基づき2000年以降，偏光光学系を取り入れた蛍光X線分析装置の製品化が行われ，微量元素の高感度分析装置として実用化されています．これらの先行研究や製品化においては，3次元偏光光学系がスペクトル中のバックグラウンド強度に与える影響に関する議論が主として行われ，蛍光X線スペクトル強度そのものに与える影響に対する実験および理論的研究は行われていませんでした．実験に基づき偏光光学系におけるスペクトル強度の変化を議論する際には，適切な測定元素種の決定や入射X線の偏光度に影響を与える幾何学的配置の厳密な校正などの要因を考慮する必要があるため，偏光の影響のみを取り入れた実測に基づくスペクトル強度の評価は容易ではないと考えられます．そこで実験に先立ち，偏光光学系のスペクトル強度への影響を電子スピンの情報のみを考慮し，励起される電子の全角運動量を基に蛍光X線の理論強度計算を行いました．ここでは電子の持つ全角運動量のベクトルモデルを採用し，直線偏光したX線を入射した際の $3d \rightarrow 2p_{3/2}$ 遷移と $3d \rightarrow 2p_{1/2}$ 遷移によって生じる蛍光X線の強度比強度計算を行いました．3d 軌道には5つの軌道が存在しますが，それらの軌道間のエネルギー差が小さくそれぞれが縮退している，すなわち 3d 軌道は球対称であるして計算を行いました．これは，3d 軌道の全てを電子が占有している Pb など重元素の分析に相当します．また，X線の強度が入射X線と出射X線の断面積にのみに比例するとして，X線の強度計算を行いました．図6は $2p_{3/2}$ および $2p_{1/2}$ 軌道における電子の有する全角運動量のベクトルモデルの模式図

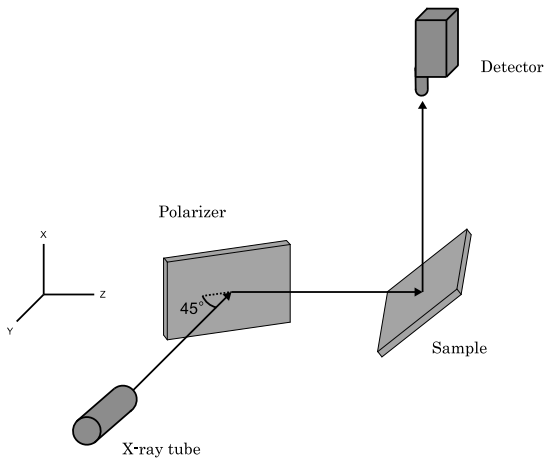


図5　3次元偏光光学系

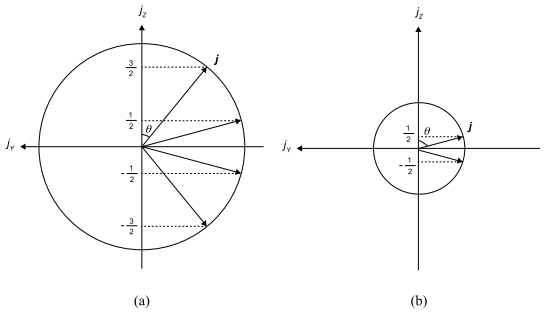


図6　角運動量のベクトルモデル（j_x 方向から射影したもの）．（a）$2p_{3/2}$ 軌道　（b）$2p_{1/2}$ 軌道

です．入射X線の偏光方向をj_z軸，全角運動量$\boldsymbol{j}$とj_z軸のなす角をθとする．$\boldsymbol{j}^2$の大きさは$j(j+1)$であるので[12]，$<\cos\theta>$は次式のように表せます．

$$\langle\cos\theta\rangle=\frac{j_z}{\sqrt{\boldsymbol{j}^2}}=\frac{j_z}{\sqrt{j(j+1)}}$$

ここでj_zはjのz成分，$<\ >$は期待値を表します．jを法線ベクトルとする面の入射X線方向および観測方向からみた成分はそれぞれ$<\cos\theta>$，$<\sin\theta>$であり，ここでは入射X線と出射X線の断面積はそれらの積の絶対値，$|<\cos\theta><\sin\theta>|$，に比例するとし，各$j_z$について$|<\cos\theta><\sin\theta>|$の和をとり，$3d\rightarrow2p_{3/2}$遷移と$3d\rightarrow2p_{1/2}$遷移によって生じる蛍光X線の強度比を算出しました．

その結果，$3d\rightarrow2p_{3/2}$遷移の場合，$\Sigma|<\cos\theta><\sin\theta>|=1.48$，$3d\rightarrow2p_{1/2}$遷移では$\Sigma|<\cos\theta><\sin\theta>|=0.94$となります．これより，偏光X線を入射した場合，それぞれの蛍光X線の強度比は1：0.64となり，これは入射X線が無偏光の場合の強度比である1：0.5[13]に比して，$3d\rightarrow2p_{3/2}$遷移に対する$3d\rightarrow2p_{1/2}$遷移の強度がおよそ30％大きい値となることがわかります．ただし，偏光X線を用いた場合，試料に照射されるX線強度そのものが小さくなるので，観測される$3d\rightarrow2p_{1/2}$遷移の絶対的な強度が大きくなるわけではないことに注意する必要があります．

図7は$2p_{3/2}$軌道の電子と角運動量を模式的に示したものです[14]．角運動量に応じて，電子の軌道は破線で示したようになり，Z方向に偏光したX線が入射した場合，$j_z=\pm3/2$のとき入射X線と$2p_{3/2}$電子の相互作用は強く，$j_z=\pm1/2$のとき弱くなります．これにより電子の有する角運動量の違いに起因して観測される蛍光X線強度に差が生じるものと考えられます．

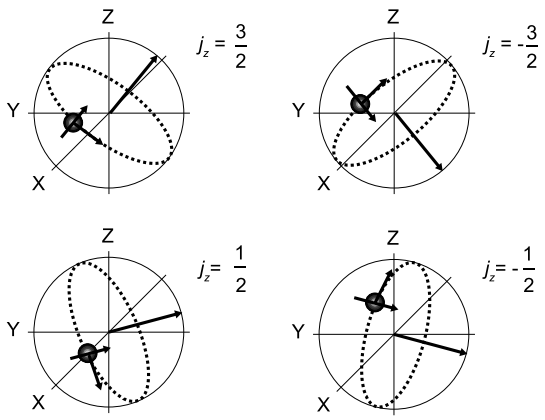


図7　入射X線と$2p_{3/2}$軌道間の相互作用に関する模式図．原図は文献14)．

上記の議論では，偏光光学系の$3d\rightarrow2p$遷移により生じる蛍光X線の強度比に与える影響を議論しましたが，微量元素の定量精度を議論するためには，他の遷移によって生じる蛍光X線の強度への影響も考慮する必要があります．上記の計算方法を$2p\rightarrow1s$遷移により生じる蛍光X線の強度変化に対して同様に適用すると，励起される1s軌道は球対称であるから，偏光依存性を示しません．これより偏光光学系を用いた場合でも，$2p\rightarrow1s$遷移により生じる蛍光X線の強度変化は起こらないものと考えられます．またp軌道からs軌道への遷移によって生じる蛍光X線，例えば$3p_{3/2}\rightarrow2s$遷移や$3p_{1/2}\rightarrow2s$遷移に関しても，生じる蛍光X線強度に偏光依存性はないと予想できます．電子のスピンのみを考慮し，偏光光学系のスペクトル強度への影響を考えた場合，励起される電子軌道の対称性の違いに起因してX線強度が変化すると考えられます．

このように，電子軌道の対称性やスピンなどのミクロな情報を，偏光光学系を用いた蛍光X線分析の定量精度に影響を及ぼす因子として考慮し，スペクトル強度の偏光依存性の有無を明らかにすることは，上述の実験室系X線源を用いた分析だけでなく，発生原理上偏光性を有する放射光を利用した蛍光X線分析における定量精度の向上にもつながると考えています．

4. おわりに

本稿では，蛍光X線定量分析の高精度化に関する基礎研究のうち，スペクトル中に生じる偽ピーク強度や偏光励起を用いたときの蛍光X線強度に対する影響について簡単に紹介させていただきました．現在は，これらの研究で得られた知見をもとに，実験室系X線源を用いた小型分析装置の開発や，それらを用いたX線に関わる物理現象の解析・金属材料分析への応用を目指し研究を進めております．金属材料の分析に関わる研究活動を通して，学生とともに実験技術の習得・研鑽に励み，新たな学理の構築および産業界への貢献ができる教育者・研究者になるため励んで参りたいと思います．今後ともご指導ご鞭撻のほど何卒よろしくお願い致します．

参考文献

1)　R. Tanaka, K. Yuge, J. Kawai, H. Alawadhi, “Artificial peaks in energy dispersive X-ray spectra: sum peaks, escape peaks, and diffraction peaks: Artificial peaks in energy dispersive X-ray spec-

tra", *X-ray spectrometry*, **46**, 5 (2017).
2) G. F. Knoll, Radiation Detection and Measurements, 3rd ed., Wiley, NewYork, 634 (2000).
3) G. F. Knoll, Radiation detection and Measurements, 4th edn, Wiley, Ohm-sha, Tokyo Japanese translation, I. Kanno, I. Kimura, E. Sakai (2013).
4) H. Amekura, V. Voitsenya, T. T. Lay, Y. Takeda, and N. Kishimoto, "X-Ray emission induced by 60 keV high-flux copper negative-ion implantation", *Jpn. J. Appl. Phys.*, **40**, 1094 (2001).
5) R. W. Ryon, "Polarization for background reduction in EDXRF - The technique that does indeed work" *Adv. in X-Ray Anal.*, **46**, 352, (2003).
6) R. W. Ryon and J. D. Zahrt, "Polarized beam X-ray fluorescence", Chapter 10 in: "Handbook of X-ray Spectrometry", R. Van Grieken and A. Markowicz ed. Marcel Dekker, Inc. (1992).
7) J. C. Young, R. A. Vane, and J. P. Lenehan, "Background reduction by polarization in energy dispersive X-ray spectrometry," in: Western Regional Meeting of the American, Chemical Society, San Diego, CA, October (1973).（文献[1]より）
8) T. G. Dzubey, B. V. Jarrett, and J. M. Jaklevic, "Background reduction in X-ray fluorescence spectra using polarization", *Nucl. Instrum. Methods*, **115**, 297 (1974).
9) K. P. Champion and R. N. Whittem, "Utilization of increased sensitivity of X-ray fluorescence spectrometry due to polarization of the background radiation", *Nature*, **199**, 1082 (1963).
10) H. Aiginger, P. Wobrauschek, and C. Brauner, "Energy-dispersive fluorescence analysis using Bragg-reflected polarized X-rays", *Nucl. Instrum. Methods*, **120**, 541 (1974).
11) P. Standzenieks and E. S. Lindgren, "Background reduction of X-ray fluorescence spectra in a secondary target energy dispersive spectrometer", *Nucl. Instrum. Methods*, **165**, 63 (1979).
12) 例えば　朝永振一郎，量子力学Ⅱ，みすず書房，p 236（1952）.
13) E. U. Condon and G. H. Shortley, "The Theory of Atomic Spectra", Cambridge Univ. Press, pp. 322-323 (1935).
14) 河合潤，増補改定　量子分光化学－分光分析の基礎を学ぶ－，アグネ技術センター，p123（2015）.

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．

地中電磁波探査への位相アレイ型アンテナ実現可能性の基礎研究

本研究では，位相アレイ型アンテナを地中レーダに組み込み，地下を効率良く探査するための基礎的な研究をおこなっている．位相アレイ型アンテナは，複数のアンテナの電磁波放射時の位相・振幅を電気的に制御することで電磁波に鋭い指向性を持たせることができるシステムである．これにより，探査範囲の拡張と探査コストの低減が可能になると考えられる．しかし，位相アレイ型アンテナを設計する際には，アンテナ素子同士が接近して配置されることが想定されるため，アンテナ間相互結合を考慮した上で最適なアンテナ設計を行わなければならない．本研究では，数値実験により上記の位相アレイ型アンテナの有用性を検証した．検証には3次元地盤モデルを用い，有限差分法により電磁波の伝播のシミュレーションをおこなった．ターゲットとして測線下と測線外の地下にコンクリートブロックを想定した異常体を設置した．

図1は，位相アレイ型アンテナによる地下可視化結果と，従来から用いられているダイポールアンテナによる結果を比較したものである．両図内の立方体は地下のターゲット位置を表しており，双方ともにイメージングがおこなえていることがわかる．しかし，ダイポールアンテナによるマイグレーション結果（左）では，振幅のフォーカスが悪く，偽像が多く見られる．一方，位相アレイ型アンテナによるマイグレーション結果では，偽像が抑制された結果を得ることができた．この結果から，位相アレイ型アンテナの地中レーダへの有用性が確認できた．

地震波速度異方性による P-S 変換波発生の基礎研究

地下の速度異方性に関する情報は，地下構造推定や広域的（または局地的）な応力場の推定，または岩石き裂の劈開方向などの推定にも有用であるため，自然地震波観測データを用いる地震防災の分野や，人工地震波を用いて地震波探査を行う資源開発の分野において重要な情報となる．過去の研究から，P 波初動と S 波初動の間に受振される P-SV 変換波に着目することで，受振波形から地下の異方性情報を抽出できる可能性が示唆されたことから，RTM（Reverse Time Migration）を用いてその発生個所の特定可能性について検証した．異なる異方性の度合いを持つ二つのモデルに対して数値実験により人工データを作成し，RTM によって地下のイメージングをおこなったところ，異方性の度合いがイメージング結果における振幅の強さに影響していることが確認された（図2）．この結果から，RTM によって地下の異方性の度合いに関する情報を抽出できる可能性が示唆された．

教　授　三ケ田　均
助　教　武川　順一

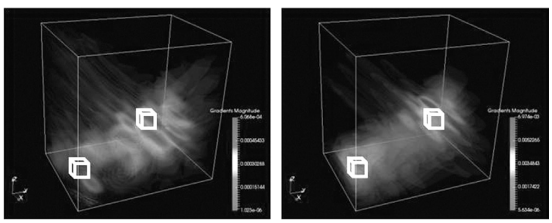


図1　ダイポールアンテナ（左）と位相アレイ型アンテナ（右）による3次元マイグレーション結果の比較．図中の立方体はターゲットとなる異常体の位置を表している．

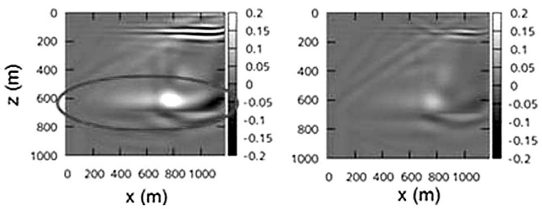


図2　RTM による3次元マイグレーション結果．左が異方性の度合いが強い場合，右が異方性の度合いが弱い場合．異方性の度合いが強い方が，地層境界面に大きな振幅が得られている（赤丸部）．

工学研究科　社会基盤工学専攻

資源工学講座
地殻開発工学分野

水と CO_2 による原位置水圧破砕試験

新しいエネルギー資源として注目を集めているシェールガスは北米やヨーロッパの固いシェール（頁岩）層に含まれている天然ガスを採掘するもので，ガスを含んでいる地層を水圧で破砕しないと採掘できない．また高温で乾燥した岩体（Hot Dry Rock）から地熱を抽出して発電を行う高温岩体発電においても，岩盤を水圧で破砕する必要がある．これらの開発に現在利用されている水を用いた水圧破砕の代わりに，地球温暖化の原因とされる CO_2（二酸化炭素）を利用することができれば，エネルギーの生産とともに CO_2 を地中に隔離することができるため，地球温暖化防止を実現するうえで有用である．

我々の研究グループは，CO_2 で岩盤を破砕すると水で破砕するより細かい亀裂が広い範囲に 3 次元的に広がり，シュールガスの生産や高温岩体発電に有利な亀裂が造成されることを室内実験で明らかにした．しかし室内実験では，破砕孔から供試体の表面にまで短時間に亀裂が進展するため，水圧破砕の範囲の大きさの違いを検討することができない．そこで，原位置の花こう岩で水と CO_2 を用いた小規模水圧破砕試験を実施し，AE（Acoustic Emission：岩盤の破壊音）の連続収録を行って破砕範囲の大きさの違いを検討した．その結果，CO_2 を用いた破砕では，水を用いた破砕よりも広範囲に AE 震源が分布する傾向がみられ，CO_2 を用いると水に比べて広範囲に亀裂が造成されることがわかった．しかし，CO_2 の圧入で観測された AE の発生メカニズムを調べると，亀裂の閉塞によると思われる AE が多数観測されていることから，AE 震源の広範囲の分布がそのまま激しい不安定な亀裂の進展を意味しているわけではないと思われ，さらに詳細にデータの分析を行っていきたいと考えている．

炭酸塩岩石のサブクリティカルき裂進展計測

放射性廃棄物処分施設や地下発電所施設などの地下岩盤構造物，石造りの歴史的建造物には，長期安定性が確保されなければならない．このため，岩石破壊の時間依存性の一つである「サブクリティカルき裂進展」に関する知見の集積が必要となる．既往の研究より，岩石のサブクリティカルき裂進展に関する知見は，主にケイ酸塩岩石において集積されており，応力のみならず，周辺環境（温度，湿度，水質）がき裂進展速度に影響を及ぼすことが明らかにされてきた．ただし，炭酸塩岩石における知見は十分ではなかった．そこで，破壊力学試験法の一つであるダブルトーション試験法を用いて，炭酸カルシウムを主成分とするカラーラ大理石のサブクリティカルき裂進展の測定を行った．特に，周辺環境（温度・湿度）を制御した環境下での計測を行うことにより，大理石のサブクリティカルき裂進展に及ぼす周辺環境の影響を調べた．

その結果，大気環境下より水中環境下の方が，き裂進展速度は上昇することが示された．また，温度が高い場合にき裂進展速度は高くなることが示された．大気環境下では，湿度が高くなるほどき裂進展速度が高くなることが明らかとなった．ゆえに，大理石のサブクリティカルき裂進展には，水と温度が大きく影響すると結論づけられる．

さらに，大気中のカラーラ大理石では，領域Ⅱ（応力拡大係数の大きさにき裂進展速度が依存しない領域）のサブクリティカルき裂進展が認められた．これは，カラーラ大理石の空隙率が 0.19％と極めて低く，岩石内部に含まれている水の量が極めて少ないことによりもたらされたと考えている．

南アフリカ大深度金鉱山における微小破壊観測

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

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

これらの観測データを用いた昨年までの研究において，鉱山内の断層で，同じ場所で同じ大きさで繰り返し発生し同じ波形を持つ，M_W − 4 程度の超微小繰り返し地震が起こっていることを明らかにしたが，本年度は M_W2 の余震中にもこのような活動が多数存在することを発見した．これらの中には震源が十分重なっており，厳密な意味で繰り返し地震とみなせるものもあるが，波形は十分にているにもかかわらず，震源決定誤差を考慮しても震源が有意に離れているものも見つかっている．本震時の断層すべりにより，面の突起部のかみ合わせパタンが急変し，それによって生じた短波長応力擾乱により，多数の面上微小破壊が一時的に生じたものと考えられる．

教　授　石田　　毅
准教授　奈良　禎太
助　教　直井　　誠

工学研究科　社会基盤工学専攻

資源工学講座
計測評価工学分野

レーザーを用いたトンネル覆工コンクリートの欠陥検出に関する研究

コンクリート構造物の維持管理のための検査手法として，打音法が良く用いられている．この打音法は，コンクリートの浮きや剥離を検知するための最も一般的な検査方法であるが，検査対象となるコンクリートの表面まで近づかなければならない，欠陥部の定量的な判定ができない，検査に多大な労力を要するなど，いくつかの問題点を有している．そのため，コンクリート欠陥検出を非接触で自動的に行える装置の開発が望まれている．本研究室では，この要望にこたえるものとして，レーザーを用いたトンネル覆工コンクリートの欠陥検出に関する研究を行っている．今年度は，実際のトンネルで実験を行い，本研究で用いる手法の現場での適用性に関して評価を行った．その結果，実際のトンネル内の剥離欠陥でも，レーザー加振によりたわみ振動が励起されることが確認された．また，そのたわみ振動は再現性が高いため，この変化を捉えることで，欠陥の進展を判定できることが示唆された．

軟弱地盤に対するロックボルトの効果に関する研究

ロックボルトは山岳トンネルの主要な支保部材の一つとして用いられているが，軟弱地盤に対するその効果に関しては，議論の余地がある．ロックボルトの効果を評価するための理論モデルとしては，ボルトを１次元のロッド，地盤を地盤ばねで表現したモデルや静水圧を受ける円形トンネルの問題にボルトの影響を組み込んだモデルなどがこれまでに考案されている．しかしながら，これらは，仮定したモデル自体の妥当性に関しての議論はされておらず，得られた結果の妥当性に関しては不明である．そこで，ロックボルトの効果を評価するための一助として，本年度は３次元弾性論を用いて，その基本的な効果について理論的に考察した．その結果，軟弱地盤に対してロックボルトを打設した場合，ボルト周辺の地盤の変形は抑制できるが，その影響範囲は限定的である．そのため，円形トンネルに静水圧が作用する場合のように，地盤に生じる変形が１次元的なものに近い場合では，ロックボルトよりも吹付けコンクリートの方が支保効果が高いことが示された．

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について

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検査があり，その方法によれば裏面欠陥まで検出できるという報告がある．渦電流が浸透しえない位置にある裏面欠陥がなぜ検出できるのか，そのメカニズムはいまだ十分には解明されていない．そこで，バイアス磁界の大小が裏面欠陥の渦電流探傷に与える効果について，実験的な検討を行った．その結果，鋼板が飽和磁化に近づく程度の大きなバイアス磁界を与えた場合に，有意な大きさのきず信号が得られること，そのようなバイアス磁界強度の下では，きず深さと信号振幅にほぼ比例関係があることが分かった．これらの結果から，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，それによる透磁率の変化が表面にまで及ぶために，渦電流が浸透しえない裏面欠陥の検出も可能となっているのだと結論づけられた．

非接触超音波検査による吊橋ハンガーロープ端末部の劣化評価

国内の既設吊橋の中には橋桁とメインケーブルをつなぐ部材であるハンガーロープの腐食による経年劣化が問題となっているものがある．ハンガーロープ全長のうち一般部分については，磁気検査法によってロープを磁化した時の磁束量と断面積の関係から腐食程度を評価可能である．しかし，その方法はロープ端末部には適用できないことからそれにかわる検査法として，磁歪効果を利用した非接触超音波法の適用を試みている．本年度は，超音波の反射減衰からハンガーロープ端末部の劣化度合を推定するための基礎研究として，端末部の欠損度合と反射減衰の関係に及ぼすロープ張力の影響について模擬試料を用いて実験的に考察した．その結果，欠損度の評価における張力の影響は無視できず，ある程度以上の腐食欠損を超音波反射率から推定するにおいても，張力が架設時の基準から大きく外れていないことが必要であることが示唆された．

准教授　塚田　和彦
助　教　保田　尚俊

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

陸域・海域での金属品位モデリングの深化

金属資源の需要は年々増加しており，金属品位の高精度空間分布推定と鉱床を形成した物理法則の解明が不可欠となっている．これらを目的として，主成分分析を組み込んだ地球統計学的手法を開発し，黒鉱鉱床のデータに応用した．これによれば，地質タイプと金属濃度，および金属ペアの相関性がすべて推定に含まれ，従来の手法よりも品位分布が詳細になるとともに，地質モデルと高濃度部との重ね合わせは熱水パスの検出に役立つこともわかった．また，鉱石試料をSEMで分析した結果，微小領域での金属濃度にも空間的相関構造が存在することが明らかになったので，この構造を考慮したマルチスケール・モデリングによって，より詳細に資源分布を推定できる可能性を見出せた．

一方，沖縄トラフの海底熱水噴出地域においては，地球統計学により海底下の比抵抗分布をシミュレートした．その結果，深度40 m付近などに，高比抵抗部の水平方向の連続性が現れた．ボーリング試料による堆積物の金属濃度分析，および噴出孔付近の間隙水イオン濃度分析によれば，これらに共通して深度40 m付近が局所的に高濃度部となっている．高濃度部の形成は熱水の沸騰による金属沈殿によるとも考えられるので，高比抵抗部の連続性は，熱水の存在と流動に対応する可能性があることが示唆された．

地殻流体流動現象の把握とモデル化

物理的手法と化学的手法を統合することで，地殻中の流体流動状態を高精度に把握し，モデル化するための研究を進めている．京都盆地をモデルサイトとした研究では，数千本のボーリングで得られた地質データや反射法地震探査データなどを活用して水理地質モデルを作成し，地下水流動解析と地下水の滞留時間の推定に用いられるトリチウムおよび六フッ化硫黄（SF_6）の物質移行解析を行った．地下水流動解析で得られた水頭は孔内水位の実測値と整合し，物質移行解析によるトリチウム濃度，SF_6濃度についても浅井戸では実測値と整合することが明らかとなった．一方で，深井戸では解析結果と実測値が整合せず，水理地質モデルの深部の水理特性を修正する必要があることが示された．

また，地下水流動と物質移行における断層の機能を明らかにすることを目的として，深度200～500 mに分布する地下研究坑道において地下水試料を採取し，地下水流動状態の理解に役立つ地化学成分や同位体の分析を実施した．その結果，断層を境界として主要溶存成分や水素酸素同位体比が異なり，浅層地下水の深部への浸透状況も断層を境界に異なるものと考えられた．断層周辺の水理地質モデルを作成し，地下水流動解析と物質移行解析を実施したところ，水頭や坑道掘削による塩化物イオン濃度の空間分布の擾乱や，トリチウムを含む浅層地下水の地下への浸透状態が断層を境界に異なることが示され，地下水試料の分析結果と整合する結果が得られた．

蒸気スポット検出技術と貯留層計算ソフトの開発

昨年度に引き続き，リモートセンシング･地球化学･鉱物学での先端手法を統合して，地熱発電に最適な蒸気スポットを高精度で検出できる技術の開発を進めている．インドネシア西ジャワ州Wayang Windu地区をモデルサイトとし，深部に位置する貯留層の状態を表層付近で把握するために，全18箇所において最大深度5 mの表層ボーリングを掘削し，計測井を設置した．これを用いて定期的なラドン・水銀濃度測定とガス組成分析を実施中であるが，透水性断層近傍に位置する測点で，深部からの地殻ガスの上昇と供給を示唆する特徴が見出された．また，当地区の光学センサ画像の反射スペクトル解析から熱水変質鉱物を抽出し，合成開口レーダ画像の偏波解析から地表面粗度を算定した．これらの組合せにより地熱兆候地の特定精度が向上したので，蒸気スポットの絞り込みに活用できる．

さらに，オブジェクト指向プログラミングを適用し，拡張性に優れた貯留層シミュレータを開発したとともに，深部地熱資源開発を想定して，これに超臨界状態計算機能を追加した．熱力学的変数を適宜変更することで液相－臨界相－気相の相移行が安定となり，温度･圧力状態の時間変化を適切に予測できるようになった．

海底熱水鉱床を対象とした電磁探査と技術開発

昨今の資源枯渇の傾向の中，海底のエネルギー・金属資源の探査手法の高度化が必要となっている．本研究室では，沖縄沖伊平屋北海域において熱水噴出孔周辺の地下比抵抗構造探査を実施した．その結果，海底下に低比抵抗域が広がっており，その一部は金属鉱床に相当すると推測された．さらに，同海域で採取された岩石試料の比抵抗を実験室にて測定し，硫化物に関する岩石比抵抗モデルを新たに考案した上で，鉱物組成や元素組成と比較した．その結果，新たな岩石比抵抗モデルが比抵抗実測値の特徴をよく説明すること，岩石比抵抗モデルの各パラメータが導電性金属の含有量や粘土鉱物含有量と良い対応にあることが明らかとなった．これによって，海底探査から金属資源量を直接的・定量的に予想する技術がより現実的になったと言える．以上の地下探査や室内実験に加えて，急峻に変化する比抵抗構造を扱うことができる地下構造推定技術（インバージョン），時系列データ中のノイズと信号を分離する新たな手法，地下構造モデルの信頼度の定量化方法などに取り組み，地下探査の高精度化を推し進めた．

教　授　小池　克明
准教授　後藤　忠徳
助　教　柏谷　公希

工学研究科　都市社会工学専攻

地球資源学講座
環境資源システム工学分野

持続可能な社会の発展と安全・安心な国民生活の確保に寄与するために，当研究室では石油や天然ガスなどの地下エネルギー資源を開発する地球工学分野から，科学掘削における地下応力状態の測定による沈み込み帯などの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，手法･ターゲットともに幅広く研究を行っている．平成28年度は，以下の研究を実施した．

南海トラフや野島断層における三次元原位置応力状態の解明

西南日本の南海トラフでは100～200年の間隔でM8クラスの巨大地震が繰り返し発生しており，次の地震は今世紀中に起こる可能性が高いと懸念されている．また，1995年に兵庫県南部地震が発生して，甚大な被害を及ぼした．地震発生のサイクルにおいては，次の地震発生までの期間（間震期）に応力が震源断層とその周辺に蓄積し，地震時に急激に解放するとされているが，応力と地震の定量的な関係は，人類にとっていまだに解明されていない謎の一つである．南海トラフでは，統合国際深海掘削プロジェクト（IODP）の第370次研究航海において，プレート境界断層の先端に位置する掘削サイトの海底下深度約500 mまでの範囲において，ASR法というコア試料を用いた測定手法により，三次元の応力状態を決定することができた．一方，兵庫県南部地震の震源断層である野島断層の掘削コア試料を利用して，その地震発生後約22年経過した現在の応力状態を測定し，断層を挟んで応力状態が変化する様態を掴めた．

石油坑井における原位置応力測定

石油・天然ガス等の地下エネルギー開発を行う際，坑井の安定性確保を含む生産井の最適設計や水圧破砕で造成するフラクチャーの方向制御のために，深部地層中の主応力方向などの情報を知ることが不可欠である．我々は秋田地域にある，既に開発された油田の再開発を視野に入れた生産性改善技術実証試験プロジェクトに参加して，産学官共同で応力総合評価の研究を実施している．平成28年度には，DCDA法およびASR法により，傾斜坑井における貯留層の深度区間で採取されたコア試料を用いて，応力状態を測定した．さらに，DSCA法による測定も行ったうえ，これらのコア試料のデータと原位置で得られた応力関連のデータ（例えば，ボアホールブレークアウトや水圧破砕のデータ）と総合検討を行い，貯留層の全体傾向を代表するような，信頼性の高い応力状態を見出す予定である．また，コア試料の直径測定から応力評価を行うDCDA法については，最大と最小水平主応力の差しか得られなかったが，当該手法の高度化研究を行い，この2つの主応力値をそれぞれ解析できるようにする見通しがついた．

石油増進回収技術への応用を目的とした水/油/鉱物界面における吸着構造の解明

低塩分濃度水攻法は，環境負荷が小さく他の石油増進回収法に比べて低コストであるため，実施事例が増えてきている．同攻法では鉱物表面の濡れ性が変化することで油回収率が増加すると考えられているが，その濡れ性の変化は鉱物表面の吸着構造の変化に依存する．そこで，本研究では，劈開により新鮮で平滑な結晶面が得られる白雲母を鉱物に，分子の形が扁球面状で吸着構造を評価しやすいと考えられるシクロヘキサンと先端のカルボキシル基によって極性を有し白雲母表面に吸着しやすいと考えられるオレイン酸を油にして，高輝度放射光施設であるSPring-8においてX線CTR散乱法測定を実施して，水/油/鉱物界面における油分子の吸着構造とその吸着構造に及ぼす陽イオンの影響を調べた．その結果，シクロヘキサンは層状に積み重なって白雲母に吸着すること，水飽和したシクロヘキサンでは，白雲母表面に約5 Åの水吸着層を形成することがわかった．また，白雲母表面に吸着したオレイン酸はNaCl水溶液や純水による掃攻では脱着しないのに対し，$CaCl_2$水溶液による掃攻では脱着することが確認でき，オレイン酸の脱着には陽イオンの交換能が影響していると考えられた．

石英およびケロジェンのナノ孔隙におけるガス滑り現象の解明

多孔質体内を流動するガスの滑り現象は，シェールガスや炭層ガス，低浸透率砂岩層ガスの流動に大きく影響する．したがって，これらのガス開発の評価には滑りの影響を正しく補正したガス浸透率を使用する必要がある．これまで様々な補正モデルが提案されているが，どのモデルが最適かについては十分に理解されていない．そこで，本研究ではガスの滑り速度および浸透率補正係数のクヌーセン数との関係を調べるため，石英とケロジェンの平行平板モデルに対してクヌーセン数を変えたメタンガス流動の分子動力学シミュレーションを行った．その結果，これらの関係は，幅が12～34 nmの比較的大きい空隙では石英，ケロジェン共にBeskokとKarniadakisの解析解（BKモデル）に従うが，幅が12 nm以下の小さな空隙ではBKモデルから外れることがわかった．特に，6 nmより小さい空隙では，滑り速度は石英の場合一定値に収束するのに対してケロジェンの場合は急に増加することがわかった．また，このBKモデルからのずれには空隙壁面のガス吸着構造が重要な役割を果たしており，特にケロジェンの小さな空隙ではその表面粗さの影響が顕著になることがわかった．

教　授　林　　為人
准教授　村田　澄彦

エネルギー科学研究科　エネルギー応用科学専攻

資源エネルギー学講座
資源エネルギーシステム学分野

銅めっきによって作製されたアルミニウム積層材のナノアンカー効果による高強度化

自動車や航空機の部品としての金属積層材の作製方法として，圧延や拡散接合，摩擦撹拌接合，レーザーマイクロ接合など様々な接合方法が開発されている．しかし，これらの方法では接合時に加熱が必要なため，高エネルギーコスト・材料の特性損失などの問題点が指摘されている．そこで当研究室ではめっきによる金属積層法を提案し，二枚のアルミニウム板の間に銅めっきを析出させ，アルミニウム板を室温で積層化することを試みてきた．しかし金属表面の酸化被膜とめっきの密着性は非常に悪く，せん断強度が1 MPa程度と低くなるという問題点があった．そこで，本研究では積層化前にアルミニウム表面を陽極酸化し，ナノオーダーの孔径のポアを持つ酸化被膜を形成させた．そしてそのポア内にめっきを充填させることで“ナノアンカー効果”を発現させ，高強度化を試みた．浴種はリン酸浴，クロム酸浴，硫酸浴を用い，電圧と陽極酸化時間を変えて，最適作製条件を検討した．

結果として，リン酸浴を使用し電圧30 Vで40分間あるいは60分間陽極酸化を行った場合に特に高強度化し，アルミニウム／銅界面強度は20 MPa以上という値が得られた．この値は比較的新しい接合技術である摩擦撹拌接合やレーザーマイクロ接合の強度よりもはるかに高い値である．また，陽極酸化被膜表面や断面の詳細な観察を行うと，陽極酸化被膜の膜厚が大きい・平均ポア径が大きい・ポア形状が樹状である場合に最もポア内にめっきが充填され，ナノアンカー効果が十分に得られるということが示唆された．これがアルミニウムと銅の界面強度向上のメカニズムであると考えられる．

ナノポーラス金の抗菌機構

ナノメートルサイズのポアとリガメントを有するナノポーラス金属は，大きな比表面積や格子定数の乱れといった表面効果に起因し，バルク金属とは異なる特性を発現する．当研究室の先行研究では，ナノポーラス金が大腸菌等の細菌に対し抗菌性を示すことが報告されており，その抗菌機構は従来の抗菌性金属素材で知られている金属イオンや活性酸素に依るものではないことがわかっている．また，遺伝子発現解析の結果からはナノポーラス金が大腸菌の細胞膜に影響を及ぼしたことが示唆されたが，抗菌機構の解明には至っていない．そこで，本研究では代謝やイオン輸送の原動力となる細胞膜の膜電位に注目し，平滑金及びナノポーラス金上で培養した大腸菌の膜電位の時間的変化を蛍光プローブにより調査することを試みた．

スパッタリング法によりスライドガラス上にAu（＞99.9 mass%）を蒸着させ，平滑金基板を作製した．ナノポーラス金基板は，さらにその上に$Au_{0.3}Ag_{0.7}$を蒸着させた後，脱合金化することで作製した．膜電位の変化を明らかにするために，大腸菌の過分極した部分に吸着する蛍光プローブ$DiSC_3(5)$を混合した培地で大腸菌を培養し，蛍光顕微鏡で観察を行った．

結果として，ナノポーラス金上の大腸菌の膜電位の変化を測定することはできなかったが，平滑金上での観察結果との比較から，$DiSC_3(5)$が大腸菌の細胞膜以外の部位に吸着した可能性が示唆された．これは，大腸菌の細胞膜以外の特定の部位が過分極していたことを意味する．また，シミュレーション結果からナノポーラス金表面の正の分極が細胞壁の負の帯電を誘発することが確認された．以上より，ナノポーラス金表面上の正の分極が細胞壁を負に帯電させた結果，細胞膜の膜タンパク質が変性を受け，抗菌性が発現するという抗菌機構を提案した．

水圧破砕により頁岩中に造成される亀裂の伸展パターンに与える岩石物性と破砕流体粘度の影響

非在来型エネルギー資源であるシェールガスは，浸透性の著しく低いシェール層に存在するため，開発にはこの層に亀裂を造成する水圧破砕法が用いられる．シェールガスの生産性向上のためには，破砕亀裂の表面積の拡大が求められる．すなわち，破砕亀裂伸展パターンに影響を与える要因とその関係性の理解が重要となる．しかし，地下深くに造成される亀裂を実際に観察することはできないことから，その理解は進んでいない．そこで，蛍光剤を添加した熱硬化性樹脂を破砕流体として用いて，実験室内で破砕亀裂を可視化する手法を開発した．本研究では，この手法を用いて，頁岩の物性や流体粘性が，水圧破砕による亀裂の伸展パターンに与える影響を検討した．

物性の異なる3種の頁岩供試体中に造成された亀裂の複雑性と，実際のシェールガス採掘現場において，造成される亀裂伸展パターンを推測するのに参考にされるBrittleness Indexとの関連性を検討した．亀裂の複雑性を亀裂本数と亀裂分岐点の数で評価したところ，Brittleness Indexの値が大きいほど，亀裂の複雑性が高くなることが明らかとなった．また，0.8, 500, 2000 mPa·sと注入流体の粘性を3段階に調整した実験を行ったところ，造成された亀裂の開口幅は，粘性が高いほど大きくなる傾向が認められた．

教　授　馬渕　　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

高温金属面に衝突する *O/W* エマルション液滴の変形，沸騰および熱伝達特性

金属素材の圧延工程では，圧延ロールや圧延材の冷却と，潤滑剤の供給を目的とする O/W（oil-in-water）エマルションのスプレー噴霧が広く利用されている．その冷却特性は，固体温度やエマルション濃度に影響されることは知られているが，スプレー液滴が固体面に衝突するときの流動や相変化現象は未解明であり，これが冷却能予測モデル構築の大きな障害になっている．本研究では，電気加熱したステンレス箔に単一エマルション液滴を衝突させ，そのときの液滴の変形および沸騰挙動と，箔の温度降下特性を実験によって研究した．液滴の抜熱量は固体温度とともに上昇し，核沸騰状態で最大値を示した．固体温度をさらに上昇させると，遷移/膜沸騰状態になり，液滴が固体面から離脱しやすくなるため，抜熱量は低下した．高油分濃度下では，水相の蒸発と油滴相の合一により油の熱抵抗層が形成され，抜熱量が低下した．また，最大抜熱量を示す固体温度も低温側に移動した．

（芦田　昌祥，現：川崎重工業㈱）

種々の金属板のスプリングバック時間依存性

金属板のプレス成形における不良現象の一つであるスプリングバックは，時間依存特性を示すことが近年報告されている．例えば，プレス成形後に下死点でパンチを保持することで，スプリングバック量が減少することが知られている．また，離型後，経過時間とともにスプリングバックが徐々に進行する現象も報告されている．これらの現象は，前者は応力緩和特性と，また後者はクリープ特性と関連づけて考察されてきた．しかしながら，これまでは素材ごとで個別に研究されるのみであり，また保持時間と経過時間の及ぼす影響を体系的に検討した事例もなく，その詳細なメカニズムはほとんど明らかにされていない．そこで本研究では，IF 鋼板，5000 系 Al 合金板，AZ31Mg 合金板を用いて引張曲げ成形試験を行い，スプリングバックの保持時間および経過時間依存性を横断的に調査するとともに，応力緩和試験およびクリープ試験を行うことで，そのメカニズムを体系的に検討した．

（鈴木　智貴，現：三菱重工業㈱）

二段階負荷を受ける純チタン板の変形挙動

工業用純チタン板は低温靭性や耐熱性，耐食性に優れており，航空宇宙分野や医療分野等で用いられている．純チタン圧延板は，常温では六方最密構造を有していること，また強い底面集合組織を形成していることから，強い変形異方性を示す．最近では用途の拡大に伴い塑性変形特性の解明が求められているが，その詳細な変形メカニズムはほとんど明らかにされていない．そこで昨年度の研究では，単調負荷および反転負荷を対象として，JIS1 種工業用純チタン圧延板の変形メカニズムを検討した．本研究では，荷重軸の変化を伴う二段階負荷を受けた際の塑性変形挙動を，実験および結晶塑性有限要素法解析により研究した．研究の結果，二次経路における降伏応力は負荷経路によって大きく異なることが明らかとなり，またその傾向を結晶塑性解析により良好に予測できた．また考察の結果，降伏応力の大小関係は一次経路における双晶活動と強い関連があることを明らかにした．

（藤﨑　悠介，現：トヨタ自動車㈱）

高温固体面に衝突する液滴の変形と沸騰現象の三次元数値解析

高温の金属材料を急冷強化する熱処理では，水を冷媒とするスプレー冷却がよく利用される．この冷却過程では，冷媒が固体表面で急速加熱され，液体から気体への相変化が起こる．液体中に低密度の水蒸気領域が形成されると，浮力や表面張力に由来する非定常かつ不安定な流動現象が誘起される．さらに，水と水蒸気の熱物性値が大きく異なることから，熱輸送のメカニズムは非常に複雑であり，その詳細は未解明である．本研究では，単一スプレー液滴が加熱固体面に衝突するときの変形挙動，膜沸騰を伴う相変化，および冷媒と固体面との熱伝達過程を 3 次元非定常熱流動数値解析する数学モデルを開発した．シミュレーション結果を他研究者による実験結果と比較したところ両者は良好に一致し，モデルの妥当性が確認できた．また，液滴径や衝突速度を大きくすると，液滴と固体面との見かけの接触領域が増大するため，熱伝達量も増加することを明らかにした．

（三輪　太志，現：千代田化工建設㈱）

高温移動平板下面へ衝突する吹上噴流の冷却特性

鉄鋼業の熱間圧延終了後のランアウトテーブル（ROT）冷却プロセスでは，高温の移動鋼板を多数のパイプラミナー流で冷却している．パイプラミナー冷却については多数の基礎研究があるが，実操業の冷却開始温度が非常に高いこと，および連続生産のため板材が高速移動することから，実操業に適用可能なデータは少ない．とりわけ，鋼板下面の吹上噴流による冷却特性の知見が非常に不足している．この問題を解決するため，吹上噴流冷却における抜熱量分布をサーモカメラと 3 次元逆解析によって高空間解像度で計測し，鋼板上面冷却の熱伝達特性との差異を調査した．その結果，噴流衝突点近傍の冷却水流動の力学的類似性が保証されれば鋼板上面と下面の冷却特性は類似性を示すことが明らかになった．しかしながら，下面冷却では衝突点から離れた領域で冷却水が落下するため，板上水が残留する上面冷却に比べ，温度降下量は若干小さくなる結果が得られた．

（森澤　建太，現：新日鐵住金㈱）

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
ミネラルプロセシング分野

ガスハイドレートにおけるゲスト分子の置換挙動の研究

近年，化石燃料の過剰使用によるエネルギー問題や環境問題が顕在化してきている．これらの問題の同時解決を図るアプローチの１つとして，CH_4ハイドレート開発におけるCO_2-CH_4ハイドレート置換法が提案されている．これは，CH_4ハイドレート内のCH_4をCO_2で置き換える手法であり，CCS技術との抱き合わせでCH_4ハイドレート開発ができると期待されている．しかしながら，CO_2-CH_4ハイドレート置換プロセスには未解明な点が多い．そこで，本研究では温度と圧力，そして，置換に用いるガス組成を様々に変化させることで置換プロセスの解明を試みた．その結果，本研究の中で最も大きな回収率を示したのは，全圧（N_2分圧）を変化させた場合であった．このことから，置換においてCO_2と同時に圧入するN_2が重要なファクターであることを推測した．そこで，純粋なN_2のみを用いて置換実験を行い，気相中のN_2とCH_4の物質量の変化量を測定した結果，気相中のN_2の減少量とCH_4の増加量は同量かつ同様の変化傾向を示した．本置換実験における温度・圧力条件をN_2ハイドレートの平衡状態と合わせて考えると，N_2ハイドレートは生成されないはずであるが，気相中のN_2減少量と同量のCH_4が増加したことから，ハイドレートの籠状構造が崩壊することなくN_2がCH_4ハイドレート内部のCH_4を追い出し，ハイドレートの籠状構造内に留まったと考察することができた．

エネルギー作物のメタン発酵に向けた前処理の研究

有機系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．メタン発酵とは，メタン菌の働きによってバイオマスからメタンを生成するプロセスであるが，発酵の過程で生成する消化液の処分コストが大きな課題となっている．そこで，消化液を液肥として通年利用可能なエネルギー作物を廃棄物と同時に投入することで，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見込んでいる．しかしながら，エネルギー作物はセルロースのような難分解性有機物を多く含んでおり，分解を促す前処理が実用化に向けて不可欠である．そこで，本研究ではエネルギー作物の一つであるラッキーソルゴーに様々な前処理を施し，エネルギー作物のメタン発酵に向けた効果的な前処理を検討した．その結果，種々発酵方法と発酵中の累積メタン発生量を比較検討したところ，熱アルカリ処理が最も効果が現れ，未処理の場合に対するメタン発生量は36℃では1.4倍，55℃では1.3倍であった．このメタン発生量増加の原因を考察するために，混合液中の溶存CODと発酵液中のpHを計測した．その結果，熱アルカリ処理は未処理に比べて約４倍のCODの値が計測された．また，発酵中のpHを測定したところ，初日から２日目にかけて他条件と比べて急激な低下がみられた．これらは，熱アルカリ処理によって試料の水溶成分が増加し，発酵２日目までに他より多くの有機酸が生成されたと考えることができる．以上より，熱アルカリ処理によってメタン発生量が増加した要因は，可溶化の促進によるものであると考えられた．

マイクロバブルのゼータ電位とその分布

捕収剤溶液中で発生させたマイクロバブル（MB）の表面電位とその変化を知ることは浮選の機構解明とプロセス制御にとって大変意義が深い．そこで本研究では，起泡剤を含む捕収剤溶液中においてShirasu porous glass（SPG）を用いて発生させたMBのゼータ電位について検討を行った．自然pHにおけるMBのゼータ電位（500個以上の平均値）に及ぼす捕収剤濃度の影響を検討した結果，ドデシルアミン塩酸塩（DAC），ヘキサデシルアミン塩酸塩（HDAC）共に，濃度が増加するとゼータ電位は負から正に増加する傾向が認められる．DACについては1.1×10^{-4}mol/Lで，HDACについては3×10^{-6}mol/Lでゼータ電位がゼロとなった．これは，HDACはDACと比べて炭素鎖が長いため，気－液界面過剰量が増加することに起因していると考えられた．また，ゼータ電位がゼロ付近を示す濃度域よりも低濃度もしくは高濃度域ではゼータ電位の分布に明確な２つのピークは認められなかったが，ゼロ付近のゼータ電位の分布はDAC, HDAC共に，正および負の領域に２つの明瞭なピークを持つことが判明した．同時に行っている気泡径測定により本系でのMBは３μm以下であること，そして，SPG膜の孔の占有面積と空気流量などから計算されるMB発生間隔は70 msec程度であることを考慮し，さらに，本系の界面活性剤イオンが物質拡散に関するFick則に従うとすると，例えば，ヘキサデシルアンモニウムイオン（HDA^+）で被覆された正のゼータ電位を持つMBが発生して上昇することにより，その孔周辺領域におけるHDA^+が一時的に希薄になり，その間に発生したMBがHDA^+で被覆されない状態で上昇して負のMBとなるというように，HDA^+の低い拡散速度が前述のゼータ電位が二重分布となる要因であると指摘した．

准教授　楠田　　啓
准教授　藤本　　仁
助　教　日下　英史

工学研究科　材料工学専攻

材料設計工学講座
材料設計工学分野

X線自由電子レーザーを用いた多孔性金属錯体の構造ダイナミクスの解明

多孔性金属錯体(Porous Coordination Polymer: PCP)は金属イオンと有機配位子からなる均一の細孔を持つ物質であり，その細孔に特定のガス種のみを吸着させることができるという特性を有している．このため，不純物ガスを取り除き特定のガス種を精製していくプロセスや，排ガスから再利用可能なガス種のみを取り出すといった工業的な用途として応用が期待でき，盛んに研究開発が進められている．

ガス吸着メカニズムに関するこれまでの研究では，静的な状態観察から状況証拠を集めて推測していく手法が主流であった．もし，ガス脱吸着時における PCP 構造の動態計測が直接的に可能になれば，既存モデルの検証にとどまらず，経験則を超えた現象理解による新奇な材料設計が期待できる．

当研究室においては，大型放射光施設（SPring-8）における X 線自由電子レーザー（XFEL）を利用し，様々な粉末試料に対する時分割 X 線回折実験を進めている．そこで，この計測手法を PCP のガス吸脱着時に適用し，PCP の構造ダイナミクスにおける新たな知見の開拓をめざした．

試料は京都大学 iCeMS 北川進グループにより提供いただいた銅(II)イオンを中心とするカゴメ格子型 PCP を用い，一酸化炭素(CO)ガスの選択的吸着反応時（沸点やサイズなどが似通っている窒素ガスとの分離）における時分割X線回折測定を行った．実験結果として，CO 吸着相の 201 回折線と 300 回折線の生成タイミングのズレが観察された．つまり，PCP 格子がガスを取り込んでいく際に異方的な構造変化を起こしている．詳細な解析により，六方晶の $\boldsymbol{a}$ 軸よりも $\boldsymbol{c}$ 軸方向から先に格子定数の変化を伴っていることがわかった．この異方的構造変化は，脱ガス相から吸着相に向かう過程で PCP 層間の結合が切れ，銅のパドルホイール構造が本来安定な平面四配位に向かっていく現象として理解できる．これらの結果を元に，銅(II)イオンの電子配置($\boldsymbol{d}^9$)や立体障害の観点などから考察したところ，層間構造の結合性を官能基のサイズや電荷移動量（電気陰性度）により制御すれば，ガス吸着効率を高める材料設計が可能であると示唆された．

マグネシウムイオン蓄電池の実現に向けた正極電極・電解液材料の開発

現代社会に普及している Li イオン蓄電池における安全性上の問題として，グラファイト負極への Li イオンインターカレーション反応が，極度の環境条件下においてはデンドライド状の Li 金属になる電解析出反応に変わり，電池内部で正極と短絡する，といったことが可能性の 1 つとして挙げられている．そこで当研究室では，既存の電池性能システムを保ちつつ，Li 金属のデンドライド電析を効果的に抑制する材料設計指針を模索している．その一環として，マグネシウム(Mg)イオンを利用した高容量の蓄電池電極と高い安定性を有する電解液の開発を行っている．正極材料として遷移金属を含むスピネル酸化物を，電解液として $Mg(TFSA)_2$ イオン液体と高濃度 $MgCl_2$ 塩と Triglyme を混合した溶媒和イオン液体を用いて調査したところ，約 2.0 eV 程度のセル電圧を保ちつつ 150 mAh/g を超える高容量の放電反応が実現できた．一方で，酸化物材料は高濃度の塩化物イオンによる融解がサイクル性などへの多大な影響を及ぼすことがわかり，その腐食性の調査をする必要が出てきた．そこで，電解質として $Mg(TFSA)_2$ を $Mg(HMDS)_2$ で代替し，さらに，正極材料として遷移金属酸化物を鉄硫化物の FeS_2 や単体の硫黄(S)に代替する試みを行った．これらを用いて電気化学試験を行ったところ，FeS_2 では酸化還元反応に対応する電流ピークは観測されなかったが，S では複数の還元電流ピークが観測された．この複数の還元電流ピークのいずれにおいても，MgS や反応中間体が生成する反応に対応していると考えられ，S が正極活物質材料として有力であることを示した．一方で，サイクルごとの容量劣化が顕著であり，S の電解液中の溶解や電位の変化などを制御していくことが必要である．

ニッケルナノワイヤ不織布を用いたリチウムイオン蓄電池の負極材料開発

近年，環境・エネルギー問題への関心の高まりから，電気自動車やハイブリッド自動車への Li イオン蓄電池の利用が積極的に行われている．しかしながら，現状の航続距離は 200 km 程度が限界であり，Li イオン蓄電池のさらなる高容量化が求められている．負極活物質に注目すると，従来のグラファイトより高い理論容量を有する合金系負極の利用が検討されているが，一般的に Li 合金化反応による体積変化が大きく微粉化を起こして歪みエネルギーを解放するため，電子の供給パスが絶たれて容量が大きく劣化する問題がある．

当研究室ではこれらの問題を解決するために，比表面積の高さに優れるニッケルナノワイヤ（Ni Nano Wires: NiNWs）不織布を集電体として用いることで，歪みを緩和し微粉化を抑制した負極活物質材料の開発を進めている．本研究では，Sn めっきおよび Sn-Ni 合金めっきを施すことで，容量向上をめざした．NiNWs 不織布上に，均一な Sn めっき被膜は得られなかったが，Ni_3Sn_4 合金および NiSn 合金であれば均一めっき被膜が得られた．これらの複合電極試料を Li イオンの負極活物質材料として評価したところ，Ni_3Sn_4 合金のみを用いた合剤電極では達成し得ない理論容量近くの大きな容量を引き出すことができた．一方で，サイクル毎の容量劣化も見られ，微粉化の抑制は不完全であったとも言える．今後は，高容量と高サイクル性を両立した材料設計が必要である．

教　　授　松原英一郎
特定教授　山田　　昇（2017年5月退職）
准 教 授　市坪　　哲（2016年10月東北大学へ異動）
助　　教　豊田　智史

工学研究科　材料工学専攻

材料プロセス工学講座
表面処理工学分野

当研究室では，新しいタイプの中温型燃料電池およびチタン等の製錬プロセスに関して，電気化学と熱力学を駆使した研究を展開している．以下に昨年度の研究概略を記す．

・プロトン伝導セラミックス型燃料電池の開発

プロトン伝導性電解質を用いた固体酸化物燃料電池は，現在実用化に至っている酸化物イオン伝導性電解質のものと比較して動作温度が低く，安価な構造材料の使用が期待できる．また，燃料希釈が起こらないために燃料の利用率も向上するなど多くのメリットを有しており，次世代の燃料電池として期待されている．

我々の研究グループでは，イットリウム（Y）などのアクセプタドープにより加湿雰囲気で優れたプロトン伝導性を発現するバリウムジルコネート（$BaZrO_3$）について，基礎および応用研究を進めている．Yをドープした$BaZrO_3$（BZY）電解質を用いた燃料電池セルの作製時，BZY-Ni系燃料極と電解質薄膜の共焼結工程においてNiが電解質中へ拡散し，プロトン伝導率の低下やBaY_2NiO_5等の第二相の生成に繋がることが問題視されている．これまでの研究で，使用するBZY粉末の熱処理温度や共焼結時のBaO活量を調整することで第二相の生成を抑制できる可能性が明らかとなった．また，BaO-ZrO_2-Y_2O_3-NiO擬四元系状態図の構築により，1500℃においてBZYのYドープ率が12％以下であればBaY_2NiO_5が生成しないことが分かった．現在，電極支持型セルの開発を目指し，企業と共同研究を進めている．

また，新規プロトン伝導性酸化物の探索を念頭に，第一原理計算に基づくプロトン伝導挙動解析の効率化に向けた取り組みも行っている．具体的には，ガウス過程（GP）に基づいた機械学習法を用いることで，酸化物結晶中におけるプロトンのポテンシャルエネルギー曲面（Potential Energy Surface: PES）評価の効率化に向けた方法論の構築を行っている．ここでは，プロトン伝導を支配する領域を“プロトンに働く力のノルムが小さい領域”と設定し，その領域を選択的にサンプリングする手法の開発を行った．立方晶ペロブスカイト型構造を有する$BaZrO_3$をモデル系に提案法のPES評価効率を調査した結果，PEを評価すべき全1768のグリッド点のうち100点程度のPE評価で支配領域を全て評価可能であることがわかった．これは，本系において，PES評価コストを5％程度に削減することに成功したことを意味している．

・チタンの新規製錬プロセス

Tiは資源量が豊富で軽くて強く，海水中でも高い耐食性を示すため，エネルギー効率の高い輸送機器や半永久的に使用可能な海洋建築物の製造にも高いポテンシャルを有す．しかし，従来の製造法は生産効率が低いために，Tiの価格は高く，一般的に普及していない．そこで当研究室では，Tiの生産性の改善を目指し，次のような2種類のTiの新しい製造プロセスを研究している．1つ目のプロセスでは，$TiCl_4$のMg還元によるBi-Ti液体合金の生成，偏析を利用したBi-Ti合金中の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については各工程の実証実験を終え，プラント化に向けた実験に移行しつつある．特に昨年度は，真空蒸留のスケールアップと蒸留条件の最適化を行い，Biをわずかに含むTi粉を得ることに成功した．さらに，3Dプリンターなどへの応用を目的に，作製したTi粉の球状化処理を行った．その結果，球状化処理を経ることで非常に良好なTiの球状粉末が得られるとともに，Bi含有量の低減が可能であることが示された．また，2つ目のプロセスでは，$TiCl_4$のMg還元による$TiCl_2$の生成と$TiCl_2$を含む溶融塩中でのTiの平滑電析を組み合わせ，Tiの箔および板材を安価に製造する．昨年度は，これまでの知見をもとに様々な基板上にTi箔を電析させた後，基板からTi箔を容易に剥離する手法を確立した．

・省エネルギー水素製造法

水素社会実現には低コストで低環境負荷な水素製造技術の確立が不可欠である．水電解による水素製造は再生可能エネルギーが利用できるが，消費電力の大きさや貴金属電極が必要などの問題点がある．そこで，銅製錬などで大量に生成するSO_2ガスをアノード活物質として用いれば，理論分解電圧を大幅に低減でき，副生する硫酸は外販等の再利用が可能となると期待される．さらに反応メディエータとしてヨウ素を用いることで，貴金属電極を用いずに低電力水素製造を実現できる可能性がある．

これまでに，SO_2をアノード活物質とすることで電解電圧を通常の水電解より低減できるという原理の確認を行うとともに，実用的なアノード材料として，炭素が白金に近い性能を示すことを確認した．さらに昨年度は，微小電極を用いて高電流密度における過電圧を精密に評価するとともにアノード反応メディエーター（ヨウ素）の濃度を検討した．その結果，電流密度600 mA cm^{-2}において拡散限界になることなくセル電圧1.8 V以下での電解が可能であることが示された．また，アノード生成物である硫酸からヨウ素を除去する方法として，溶媒抽出が適用できる可能性が示された．

・排熱の有効利用のための化学蓄熱材料

工場などでは100－250℃程度の排熱が多量に捨てられている．化学蓄熱は化学反応を利用した蓄熱技術であり，排熱の有効利用のための技術として期待されている．しかし，実用上求められる条件（安全･安価･高蓄熱密度・高繰り返し耐久性・非腐食性）を満たしつつ，低い反応温度域（250℃以下）と十分な反応速度を両立する反応系は未だ見つかっていない．そこで本研究では，新規化学蓄熱材候補として希土類硫酸塩$Ln_2(SO_4)_3$･$x$$H_2O$（Ln＝La, Ce, Pr, Nd）の脱水・水和反応に着目し，反応の熱力学特性の調査および反応メカニズムの解析を行っている．昨年度までに，$La_2(SO_4)_3$･$x$$H_2O$の脱水・水和反応は80－250℃の間で進行し，良好な繰り返し性および小さな温度ヒステリシスを示すことから，250℃以下で動作する蓄熱材として期待できることが示された．この反応メカニズムについて実験と第一原理計算により検討したところ，$La_2(SO_4)_3$結晶中へH_2Oが脱挿入され，H_2Oは結晶中を水分子の構造を保ったまま拡散することが明らかとなった．現在は高速な水和反応の由来を明らかにすべく，第一原理計算による結晶中のH_2Oの拡散係数の見積もり及び実験による試料の微細組織・サイズの調査等を行い，水和反応の律速過程の特定および反応速度の定量化を目指している．

教　授　宇田　哲也
准教授　豊浦　和明
助　教　畑田　直行

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，統計熱力学，量子力学などに基づき，新しい分析手法・デバイスの開発，新物質創生のための基礎理論や計算手法の開発を行っている．以下に昨年度の研究概略を示す．

【蛍光X線定量分析の高精度化に関する基礎研究】

(1) XRFスペクトル強度に影響を与える諸因子に関する研究

微量元素の分析精度に影響をあたえるX線スペクトルに現れるピーク強度について，試料濃度・入射X線強度・装置の時間分解能の観点から解析式を導出し，実験で得られたピーク強度を定量的に説明することに成功した．また，特性X線スペクトルの強度比が入射X線の偏光度に依存して変化する現象を，電子の有する角運動量の違いをあらわに取り入れ，励起される軌道と電子スピンの相互作用の観点から説明し，偏光に依存したX線スペクトルの理論強度を算出した．現在，測定試料からの熱輻射や伝送線路内の反射波がX線スペクトル強度に及ぼす影響，検出器の経時変化に起因して生じる測定値の変化に関して実験・解析を進めており，それら諸要因を考慮した高精度蛍光X線分析手法の開発を行っている．

(2) サンプリング量と定量精度との関係に関する研究

走査トンネル顕微鏡などの原子分解能を有する表面顕微鏡を用いた分析における微量元素の検出下限を，サンプリング量と試料濃度の関係に基づき明らかにした．原子分解能を有する表面顕微鏡を用いた場合であっても，表面に存在する極微量不純物元素の濃度を高精度に測定するためには，試料濃度に応じて多くのサンプリング原子を必要とすることを明らかにした．現在，組織の不均一性や装置の空間分解能，構成元素によるX線の励起・吸収の効果を考慮した場合のサンプリング量と試料濃度の関係に関して数値シミュレーションを行っており，鉄鋼材料中非金属介在物のX線分光分析へのアプリケーションを目指している．

【構造自由度の調和性：平衡状態の構造と系のPotential Energyの対応】

ある温度において平衡状態の微視的構造(S)を観測したとき，その情報のみから系のPotential Energy (PE)は一意に決まるか(SPE対応)？これは一般的に多体系では非自明な逆問題である．我々は統計力学に基づいて，PEと(ほぼ)全単射の対応のとれる微視的状態の部分集合が存在し，かつその集合を（相互作用や温度の情報を用いずに）先験的に知ることができることを導いた．さらに，SPE対応が厳密に保証される調和系からのズレを決める「構造自由度の調和性」により，一意性がuniversalに特徴付けられることも明らかにした．これらのことは，系の構成粒子に対する空間的拘束の幾何学がSPE対応において本質的な役割を担っていることを強く示唆している．

【小型偏光励起蛍光X線分析装置の開発】

偏光X線を励起源として用いた蛍光X線分析は，スペクトル中のバックグラウンドが著しく軽減されるため，微量元素の高感度分析手法として用いられている．当グループでは，低出力X線源を用いた小型偏光励起蛍光X線分析装置の開発を行った（図1）．現在，X線源・検出器の配置校正やX線偏光子の選択などにより鋼材中微量元素分析の高精度化を目指している．また，低出力X線源を用いた小型装置は，熱や振動など外場の擾乱の原因となる要素が低減され，スペクトル中のノイズを抑制することができる．このような小型装置を用いることで，偏光の影響のみに起因する特性X線スペクトル強度変化を実測に基づき解明することが可能になり，実験室系X線源を用いた分析だけでなく，発生原理上偏光性を有する放射光を利用した蛍光X線分析における定量精度の向上にもつながると考えている．

教　授　河合　　潤
准教授　弓削　是貴
助　教　田中　亮平（2017年4月着任）

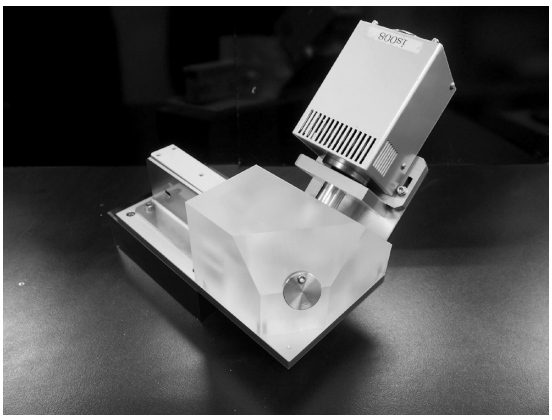


図1　小型偏光励起蛍光X線分析装置

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

カルコパイライト型リン化物における ホモ pn 接合の形成

当研究室では，薄膜太陽電池の光吸収層材料としてカルコパイライト型リン化物半導体に着目している．中でも，$ZnSnP_2$, $CdSnP_2$は同じ結晶構造を有しているにもかかわらず，ノンドープでそれぞれ p 型伝導，n 型伝導を示す．12族元素が異なるだけで伝導型が異なることは大変興味深く，デバイスへの応用が期待される．我々のこれまでの研究により，$ZnSnP_2$-$CdSnP_2$系は全率固溶することがわかっており，$ZnSnP_2$/$CdSnP_2$接合はいわゆるホモ pn 接合と見なせる．そこで本研究では，両リン化物半導体のバルク結晶育成，物性評価，およびこれらを拡散接合させることによる pn 接合の形成を試みた．

まず，すずをフラックスとする溶液成長法によりバルク結晶を作製し，ホール効果測定を行ったところ，$ZnSnP_2$は p 型，$CdSnP_2$は n 型伝導であることを確認した．次に，両結晶の鏡面研磨した面を合わせ，熱処理による拡散接合を試みた．熱処理後の試料断面の観察結果から，界面の一部分ではあるが，Zn と Cd の相互拡散による接合を確認した．この試料に対して，電流密度－電圧（J-V）特性の評価を行ったところ，整流作用を示すことがわかった．J-V 特性評価の際には，スパッタリングにより成膜した Cu と S3を電極として用いているが，これらはそれぞれ$ZnSnP_2$, $CdSnP_2$とオーミック接合を形成することがわかっている．したがって，本研究で確認された整流作用は，$ZnSnP_2$/$CdSnP_2$接合界面に起因するものであり，当初の目論見通り，pn 接合が形成されたと推察している．現在は，さらに良好な界面形成，および太陽電池デバイスへの応用を目指した研究を展開している．

モリブデン/ソーダライムガラス界面における ナトリウムの拡散現象

Cu(In, Ga)Se_2(CIGS）を用いた太陽電池は Al/Al-doped ZnO/ZnO/CdS/CIGS/Mo/SLG という積層構造を有しており，22.6％という高い変換効率を記録している．CIGS 光吸収層は多元蒸着法，あるいはセレン化法により成膜されるが，このとき，ソーダライムガラス SLG 基板に含まれる Na が Mo 電極を介して CIGS 層へ拡散し，キャリア再結合を抑制していることが高変換効率を示す一因であるとされている．これまでに，CIGS における Na 効果については数多くの研究がなされているが，Mo 裏面電極中の Na の挙動についてはあまり研究が行われていない．そこで本研究では，SLG 上に Mo 薄膜を積層した Mo/SLG 試料をモデル材料として，Na の挙動について明らかにすることを目的とした．

スパッタリングにより作製した Mo/SLG 試料を種々の温度，時間で熱処理し，グロー放電発光分析（GD-OES）により，Na, Mo, Ca, Si の深さ方向の濃度分布を測定した．その結果，熱処理後の試料においては，Na が Mo 膜中に存在していることが確認された一方，SLG に含まれる Ca, Si のプロファイルは熱処理前後で変化はなかった．以上から，従来の報告通り Na のみが Mo 中を拡散していることがわかった．また，Na が Mo/SLG 界面に偏析しており，熱処理温度が高いほどその傾向が強いことが観察された．X 線光電子分光（XPS）測定からは，Mo 中の Na が金属状態で存在することが示唆された．以上の結果から，SLG 中の酸素と結合している Na が Mo によって還元されることで，Na が Mo 中を拡散すると考察している．今後は詳細な XPS 測定に加えて，熱力学的な観点からの検証を行う予定である．

$ZnSnP_2$太陽電池の開発

当研究室では，これまで$ZnSnP_2$を用いた太陽電池に関する研究を遂行してきたが，その変換効率は未だ 0.1％程度であった．そこで，薄膜ではなく，バルク結晶を用いて，太陽電池デバイスにおけるヘテロ接合界面の詳細なおよび検討を行い，高効率化への指針を明確にすることを目的とした．太陽電池デバイスにはいくつかのヘテロ界面が存在するが，本研究では特に，$ZnSnP_2$/裏面電極，バッファ層（CdS)/$ZnSnP_2$界面に着目した．

まず，裏面電極材料の検討を行った．従来化合物半導体太陽電池で一般的に用いられてきた仕事関数の大きい Mo を用いた場合，$ZnSnP_2$とショットキー接合を形成することが分かり，$ZnSnP_2$太陽電池の電極材料として不適切であることが示唆された．一方，Cu を電極として 300 ℃ で熱処理を行うことによりオーミック接合が形成されることがわかった．STEM-EDX による断面分析の結果，Mo/$ZnSnP_2$界面では 3000 ℃ の熱処理で相互拡散が見られなかったのに対して，Cu/$ZnSnP_2$界面では反応化合物層の形成が確認され，この界面化合物の存在が接合に影響を与えていることがわかった．実際に，太陽電池を作製し，特性評価を行ったところ，熱処理によって直列抵抗成分が低減できることがわかった．さらに，王水により$ZnSnP_2$表面をエッチングし，研磨ダメージ層の除去を行うことで，良好な（CdS)/$ZnSnP_2$界面を形成することに成功した．その結果，$ZnSnP_2$を用いた太陽電池としては世界で初めて変換効率約 2％を記録した．さらに，バンドアライメントを考慮することで，変換効率が向上することを確認している．これは，これまで有望性が指摘されながらもデバイスが実現されてこなかった$ZnSnP_2$の太陽電池研究にブレイクスルーを与えるものである．

准教授　野瀬嘉太郎

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

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．これまでに FT-IR（フーリエ変換赤外分光）測定と理論計算による赤外線吸収のシミュレーションを行うことで，この構造が C_{20} フラーレンの１次元重合体である可能性を見出し，提案した．これまで実験は全て(111)表面上で行っていたが，今回(110)表面での研究を試みた．実験の結果，(110)面の[1-10]方位にはこれまでと同様 C_{20} フラーレン１次元重合体と考えられる構造が形成されているのに対して，[001]方位ではより周期の長い構造が観察されることが明らかになった．この周期の長い構造は炭素吸着時の微妙な条件の違いによって形成の成否が依存しており，両方向ともに従来と同様の構造が形成される場合もあり，今後の研究課題である．また長い周期の構造の同定と併せて現在研究を行っている．

バルク試料の STM による組織観察

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，代表的な材料の評価手法である透過型電子顕微鏡と比較すると，STM には，元素の識別が非常に困難である点，スケール（距離）の不正確さ，試料表面の作製法が一般には確立されていない点，など多くの欠点がある．この点を克服すべく本年度より 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本格的に開始した．３次元アトムプローブは先端を先鋭化した試料に高電圧を印加し先端から原子を電界蒸発させ，イオンとなって蒸発した原子を位置敏感検出器で検出することにより，元素の同定，試料内での位置の測定を行うもので，その特徴は STM と相補的なものになっている．本研究では，電界蒸発によって形成された表面を STM 観察することで，３次元アトムプローブでは得られなかった高い空間分解能での観察を可能にすることを目的に研究を行っている．本年度は針状の試料に STM の探針を誘導するという技術的な困難を，マルチプローブの形成によって回避するというアイディアの実証を行った．具体的には Si（001）の異方性エッチングによって形成した Si ピラミッド（群）がマルチプローブとして使用できること，また実際にアトムプローブにて測定後の試料表面を STM にて観察可能なことを示した．今後はより高分解能の STM 観察を目指す．

金属単原子接点破断の温度依存性

金属単原子接点は電極間を原子１個で架橋した構造であり，原子・分子デバイスの微細配線への応用が考えられている．このことから応用上，接点の安定性は重要な要素である．単原子接点の安定性に関しては，接点破断の活性化エネルギー W を接点に加わるバイアス電圧 V および引張力 F の１次関数を使用して $W = E - \alpha V - \beta F$ のように見積もることが提案されているが，その妥当性は十分に検証されておらず，また各パラメータに乗じる係数 α，β に関しての情報も少ない．このことから分子動力学シミュレーションを用いて，ナノワイヤの引張変形のシミュレーションを行い，特に単原子接点の破断直前の引張力 F の温度依存性を調べることで，提案されている式の妥当性の検証を行った．シミュレーションは Au，Ir，W の[100]方位のナノワイヤを用いて行った．接点が破断に至った際の引張力 F の温度依存性を調査することで，係数 β に関する知見を得ることを試みた．シミュレーションの結果，柔らかい金属である Au に関しては比較的大きな β（～0.3 eV/nN）が得られ，硬い金属である Ir，W に関しては小さな β（～0.1 eV/nN）が得られた．今回の結果は，点原子接点の安定化エネルギー（接点破断のエネルギー）の力に対する感受率が Au で大きく，Ir，W では小さいことを示している．この金属種による相違はそれぞれの金属の剛性の高低によって定性的に理解することができる．

Zn ナノワイヤの引張変形シミュレーション

hcp 金属は変形モードが限られるため脆く，ナノワイヤの場合にも単原子接点の形成に至らず破断する場合がある．ところが Zn では当研究室でナノ接点が異常に伸長する現象が観測されており，その伸長長さは100原子距離を超える長さであると見積もられている．本研究ではこの特異な現象の解明を目的に Zn ナノワイヤの分子動力学シミュレーションを行った．多数回のシミュレーションの結果，分子動力学シミュレーション下では実験で観察されたような異常伸長は観察されないことが明らかになった．この原因としては分子動力学シミュレーションに用いたポテンシャルの問題が考えられ，今後は第一原理計算に基づく原子間ポテンシャルの構築が望まれる．

教　授　酒井　　明
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

第一原理計算による HCP 金属の双晶変形モードの解析

HCP 金属の力学特性は，その結晶構造に由来して大きな異方性がある．主たる変形機構であるすべり変形について，HCP 金属の場合は底面すべりが起こりやすい一方で，c 軸方向の成分を含むすべり系は相対的に起こりにくい．そのため，HCP 金属では双晶変形という別の機構が働くことが知られている．双晶変形は結晶格子全体のせん断と，反転した構造になるように格子点に 2 つずつある各原子が規則的に再配列する，いわゆるシャッフリングという 2 つの要素に分けて考えられる．この変形機構について，過去に観察結果から得られるひずみ量やシャッフリングモデルが提案されている．

本研究では，実験的に報告されている $\{10\bar{1}2\}$, $\{10\bar{1}1\}$, $\{11\bar{2}2\}$, $\{11\bar{2}1\}$ 双晶を対象に，複数の HCP 金属の完全結晶構造モデルに第一原理計算を適用し，双晶変形過程の解析を試みた．その結果，ひずみの増加に応じて全エネルギーも増加していく一方で，フォノン分散曲線において，$\{10\bar{1}2\}$ 双晶では M 点に，$\{10\bar{1}1\}$, $\{11\bar{2}2\}$ 双晶では H 点に，$\{11\bar{2}1\}$ 双晶では A 点に，結晶構造の動的不安定性を示す特徴的な虚数振動モードが現れた．その不安定な構造に対して，虚数振動モードに従った変位を各原子に与えることで，複数のモデルで原子の自発的な再配列が起こり，全エネルギーが解放されて安定な反転構造に移ることが確認された．この自発的な再配列が実際の双晶変形におけるシャッフリングと対応していると考えられ，過去に提案されたシャッフリングモデルとも一致した．

無機化合物結晶構造の機械学習手法による分類

結晶構造は多種存在し，様々に整理・分類されている．例えば, Inorganic Crystal Structure Database（ICSD）には，約19万件のデータが収録されており，そのうち 80％の約15万件の結晶構造が，空間群やワイコフ位置の占有状況などにより，約 9000 の structure type に分類されている．固体化学の標準的な教科書では，ペロブスカイト型，スピネル型などといった代表的な結晶構造型に基づいた分類がされており，その類似構造型や派生構造型が紐付けられている．しかし，このような結晶構造の分類は，定義が明確ではなく，研究者の直観に委ねられている．また，未分類の結晶構造が多数あり，理想的な構造から外れている構造や複雑な構造は分類されていない場合がある．

本研究では，無機化合物の結晶構造および結晶構造型を客観的な指標のもとで統一的に分類することを目的として, 機械学習手法を用いた分類方法を提案する．機械学習では人間の想像が及ばない量や次元のデータであっても扱うことが可能である．まず，ICSD に収録されている全化合物を，結晶構造の原子同士の角度関係から得られるボンドオーダーパラメータと，距離関係から得られる動径分布関数の記述子を用いて記述した．そして，それらを機械学習手法の階層的分類方法の一つであるウォード法を用いて分類した．また，結晶構造同士の類似度を直観的に把握するために，MDS 法を用いて全結晶構造を 2 次元散布図に表した．その結果，同じ structure type に属する結晶構造同士でも異なる結晶構造型に分類，また，異なる structure type に属する結晶構造同士でも同じ結晶構造型に分類したほうが合理的である結晶構造を多数発見した．以上のように機械学習手法により無機化合物結晶構造を客観的指標のもとで合理的に分類し，新たな結晶構造分類を提案した．

第一原理計算による超弾性合金の応力下での動的安定性

形状記憶合金は温度変化，応力，磁場などの外場によってマルテンサイト変態を引き起こす．これらはマルテンサイト変態により形状記憶効果，超弾性効果，磁性形状記憶効果などの特徴ある性質を示すことが知られており，様々な応用がなされている．マルテンサイト変態は無拡散変態であるため，マルテンサイト変態に関わる微視的な物理現象を，実験的に観測することは難しい．そこで，本研究では，形状記憶合金の中でも実用上重要な超弾性合金に着目し，その動的安定性について第一原理計算を用いて調べた．超弾性合金は，応力誘起によりマルテンサイト変態が発生し，応力除荷によって逆変態が起こることで，超弾性が発現する形状記憶合金である．この超弾性合金の母相について弾性定数やフォノン振動数を第一原理計算により得て，結晶の応力下での動的安定性を求めた．具体的には，CuZn および Cu_2AlMn に着目した．これらの合金に対していくつかの方向に一軸応力および剪断ひずみを加えた場合の構造を，第一原理計算を用いて求めた．その結果，CuZn および Cu_2AlMn ともに，力学的な異方性が強いことが分かった．例えば，応力負荷方向によってヤング率やポアソン比が大きく異なっており，特徴的な力学的性質を示すことが分かった．また，得た構造におけるフォノン振動数に注目し，これらを，第一原理フォノン計算を用いて求めた．フォノン計算においては，マルテンサイト変態と関連する振動モードのフォノンに注目して調べた．その結果，応力負荷時に特定の振動モードについて，フォノン振動数が虚数となり，動的に不安定となる場合があることが分かった．

教　授　田中　　功
准教授　世古　敦人
助　教　林　　博之

工学研究科　材料工学専攻

材料物性学講座
結晶物性工学分野

FCC 構造を有する Cr-Mn-Fe-Co-Ni 高エントロピー合金単結晶の力学特性

高エントロピー合金（High Entropy Alloy: 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，優れた力学特性や特異な物理特性を示すため，近年学術的にも工業的にも注目されている．これまでの研究により FCC 構造を有する Cr-Mn-Fe-Co-Ni 等原子量 HEA 多結晶材は高強度かつ延性・靱性に優れることが報告されているが，変形機構の詳細については十分に理解されていなかった．本研究では Cr-Mn-Fe-Co-Ni 等原子量 HEA 単結晶の圧縮および引張試験を行い，変形機構および活動変形モードの臨界分解せん断応力（CRSS）等の力学特性の調査を行った．その結果，通常の FCC 金属と同様の $\{111\}\langle 10\bar{1}\rangle$ すべり系が活動すること，CRSS が温度依存性および歪速度依存性を示すこと，CRSS の値が一般的な二元系 FCC 固溶体合金の数倍から数十倍以上高いこと，積層欠陥エネルギーが純銅程度と比較的低いことなどが明らかとなった．

Ir 多結晶の低延性の要因解明

FCC 金属の一つである Ir は，他の FCC 金属と異なり，特異的に多結晶延性が乏しいことが知られているが，その原因についてはこれまで明らかにされていなかった．本研究では，Ir 多結晶の低延性の要因を解明するため，単結晶および多結晶の変形試験，粒界偏析の調査ならびに第一原理計算による粒界特性の理論的検討を行った．単結晶の引張試験により，活動すべり系の特徴は他の FCC 金属と同様であり，また数十％もの引張伸びが観察されたことから単結晶状態では十分な延性を有していることがわかった．また多結晶中の粒界の 3 次元アトムプローブ解析では不純物元素の粒界偏析は認められず，粒界偏析が多結晶の乏しい延性の要因ではないことを確認した．さらに対応粒界の第一原理計算の結果から，Ir の結合の強い指向性に起因して Ir 粒界での電子密度が Cu や Al のそれと較べて著しく低下していることが粒界強度を低下させていることが，多結晶の低延性の要因であることが示唆された．

選択的レーザー溶融法による $MoSi_2$-Mo_5Si_3 共晶合金単結晶の作製

これまでに Ni 基超合金に替わる超高温構造材料の候補の一つである $MoSi_2$-Mo_5Si_3 共晶合金は一方向凝固により単結晶化することにより，優れた高温強度を示すことを明らかにしてきた．当該合金の実用化のためには部材化プロセスの確立が不可欠であるが，非常に高融点（～1900℃）のため，Ni 基超合金で使われているるつぼを用いた単結晶部材化プロセスの適用は困難である．本研究では新しい部材作製法として注目されている積層造形法の $MoSi_2$-Mo_5Si_3 共晶合金への適用のための基礎を確立することを目的とした．光学式浮遊帯域溶融装置を用いた一方向凝固により作製した $MoSi_2$-Mo_5Si_3 共晶単結晶合金表面を選択的レーザー溶融法によりさまざまな条件で急速溶融－凝固させ，得られた溶融－凝固部の詳細な組織観察ならびにビッカース硬度計を用いた硬さ測定，破壊靭性評価を行うことにより様々な基礎的知見を得た．

M_5Si_3 型遷移金属シリサイド単結晶のマイクロピラー圧縮変形

2000℃ を超える高融点と優れた高温強度とを併せ持つ M_5Si_3 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，その塑性変形挙動については詳細な変形機構については未だ不明な点が多い．本研究では脆性材料の塑性変形挙動の新しい調査方法として注目されているマイクロピラー圧縮試験法により各種 M_5Si_3 型遷移金属シリサイド単結晶の室温塑性変形挙動について調査した．その結果，Mo_5SiB_2 相では荷重軸方位の制御により 3 種類の異なるすべり系を活動させることに成功するとともに，TEM/STEM による組織解析により活動変形すべり系の詳細を明らかにした．又，Mo_5SiB_2 相と同じ結晶構造を有する α-Nb_5Si_3 相についてもすべり変形が確認した一方で，結晶構造の異なる Mo_5Si_3 は塑性変形能を示さないことを明らかにした．このような室温塑性変形能の違いは破壊靭性値と相関があることがわかった．

Mg-TM-RE 系 LPSO 化合物の塑性変形

長周期積層（LPSO）構造を有する析出物相（Mg-LPSO 相）を含む Mg-遷移金属（TM）-希土類（RE）系合金は高強度と良好な延性を兼ね備えるため新規軽量構造用材料として期待されている．新規 Mg 合金が示す優れた力学特性は Mg-LPSO 相の変形挙動と密接に関連していると考えられているが，その詳細には不明な点が多い．本研究では Mg-LPSO 相の塑性変形機構を明らかにする目的で Mg-LPSO 相の単結晶マイクロピラー圧縮試験その場観察や TEM，STEM を用いた詳細な欠陥構造解析を行った．その結果，Mg-LPSO 相の底面すべりは転位が結晶中に存在する TM_6RE_8 原子クラスターを切断しない原子層間を運動することにより生じること，方位差が大きい変形帯境界部において原子の再配列が生じていることを明らかにした．これらの結果に基づき，Mg-LPSO 相における変形帯の形成モデルを考察した．

教　授　乾　　晴行
准教授　岸田　恭輔
助　教　岡本　範彦

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

中 Mn 鋼におけるフェライト＋マルテンサイト Dual Phase 組織の形成と力学特性

近年，強度と延性を両立させ，かつ合金元素添加量を抑えた中 Mn 鋼（Mn 量：3～10 wt.%）が次世代高強度鉄鋼材料として注目されている．本研究では実際の鉄鋼の製造プロセスに則して，オーステナイトを出発組織とする加工熱処理プロセスにおける中 Mn 鋼の組織形成過程を系統的に調べた．その結果，オーステナイトの加工中に変態が生じる動的フェライト変態を利用することによって，種々の分率の微細なフェライト粒を有するフェライト＋マルテンサイト Dual Phase（DP）組織を形成できることを明らかにした．また，この中 Mn 鋼 DP 組織は，軟質なフェライト相が存在しているにもかかわらず，高い強度と十分な延性を示すことを見出した．

フェライト＋マルテンサイト DP 鋼の変形挙動に及ぼす粒径の影響

軟質なフェライト相と硬質なマルテンサイト相から成る低炭素 DP 鋼の力学特性を調べ，結晶粒微細化によって強度と延性がともに向上することを明らかにした．また，画像相関法により求めた各相の塑性ひずみと，その場中性子回折実験により求めた各相の弾性応力（内部応力）を組み合わせることで，DP 鋼全体の応力－ひずみ曲線を，フェライトとマルテンサイトそれぞれの応力－ひずみ曲線に分解することに成功し，結晶粒微細化で実現された均一伸びの向上は，軟質相と硬質相の間の変形の適合性を満たすために生じる内部応力に起因するものであることを明らかにした．

完全再結晶組織を有する高 Mn オーステナイト鋼の変形メカニズムと粒径の関係

多パス冷間圧延と焼鈍処理を施すことによって，平均結晶粒径 0.45 μm～85.6 μm の完全再結晶組織を有する高 Mn オーステナイト鋼を作製することに成功し，力学特性と変形機構におよぼす結晶粒径の影響を調べた．変形組織観察および放射光 X 線解析の結果，結晶粒微細化に伴って，塑性変形初期の転位および変形双晶の量が増加することが明らかとなった．超微細粒材では，降伏から塑性変形初期にかけて，粗大粒材にはない転位・双晶の生成源が活動する新たな変形機構が働いている可能性が示唆された．

低炭素鋼におけるマルテンサイトおよびベイナイトの低温脆性と微視組織の関係

低炭素鋼におけるラスマルテンサイト組織およびベイナイト組織の低温脆性破壊挙動と微視組織の相関を組織学・結晶学的な観点から調べ，{001}へき開面の方位差が小さいバリアントの集合である Bain unit がラスマルテンサイト組織およびベイナイト組織の低温脆性を支配する微視組織単位であることを明らかにした．さらに，Bain unit サイズを変化させたベイナイト組織に対して，種々の温度で微小シャルピー衝撃試験を行うことによって，Bain unit の微細化に伴い低温脆性破壊特性が向上することを実験的に証明し，その要因を破壊力学に基づくクラック進展開始抵抗やクラック伝播抵抗の観点から明らかにした．

低炭素マルテンサイト鋼の水素脆性破壊挙動におよぼす変形条件の影響

ラスマルテンサイト組織を有する低炭素鋼の水素脆化感受性と変形条件（ひずみ速度や変形温度）の相関を系統的に調べた．引張変形時の材料中の局所水素分布を水素マイクロプリント法により可視化し，変形中に水素がラスマルテンサイト組織中の特徴的な境界・粒界上に集積するようになること，特に旧オーステナイト粒界に沿って水素が優先的に集積することを実験的に証明した．変形中の旧オーステナイト粒界への水素集積は，転位の水素輸送効果によるものであることを明らかにし，水素脆性破壊挙動の変形条件依存性が転位運動による水素輸送効果の観点から矛盾なく説明できることを示した．

低炭素マルテンサイト鋼の水素脆化破壊挙動におよぼす応力分布およびひずみ分布の影響

低炭素マルテンサイト鋼の水素脆化破壊挙動におよぼす応力分布およびひずみ分布の影響を調べた．応力集中係数および拡散性水素量の異なる両側切欠き付き平板試験片を用いた引張試験を行った結果，水素脆性クラックの発生サイトが拡散性水素量によって変化することがわかった．FEM 計算により応力分布・ひずみ分布とクラック発生サイトの関係を調べ，拡散性水素量の増加に伴い，水素脆化破壊が塑性ひずみ支配の破壊から静水圧応力支配の破壊へと遷移することを明らかにした．

微細粒マグネシウム合金の創製とその力学特性

純マグネシウムと，固溶体型および微細析出物を含む二種類の異なるマグネシウム合金（Z6 合金（Mg-6.35 wt%Zn）および ZK60 合金（Mg-6.2 %Zn-0.57 wt%Zr））において，HPT による巨大ひずみ加工とその後の焼鈍熱処理によって，結晶粒径 1.8 μm から 2.3 μm の完全再結晶微細粒組織を得ることに成功した．純マグネシウム微細粒材は結晶粒径に依存して特異な力学挙動を示すこと，そして ZK60 合金微細粒材は高い強度と大きな延性を合わせ持つことを明らかにした．

純チタン圧延再結晶板の力学的異方性におよぼす結晶方位と粒径の影響

純チタン圧延再結晶板が示す特異な力学的異方性の要因を結晶方位および粒径の観点から調べた．工業用純チタン JIS 1 種の圧延完全再結晶板に対して，圧延方向（RD）と板幅方向（TD）の 2 つの異なる方向で引張試験を行った結果，結晶粒径によらず，RD 引張材は均一伸びが大きく局部伸びが小さいのに対し，TD 引張材では降伏応力が早期に最大値に達し，その後大きな局部伸びを示すことがわかった．引張変形中の方位変化や活動すべり系の解析から，TD 引張材における大きな局部伸びは，方位回転に伴う幾何学的軟化および錐面すべりの活動に起因していることが示唆された．

教　授　辻　　伸泰
准教授　柴田　暁伸
助　教　白　　玉（BAI YU，バイ　イ）

工学研究科　材料工学専攻

先端材料機能学講座
先端材料機能学分野

放射光X線イメージングを用いた時間分解・その場観察手法の開発

金属材料の凝固・結晶成長は，組織制御や欠陥の抑制，さらに材料特性の発現のため，理解が必要不可欠の過程である．にもかかわらず，高温，可視光に対して不透明であるため，凝固していく過程をありのままに観察するその場観察（in-situ）はこれまで困難であった．当研究室ではSPring-8などの放射光施設で利用可能な10 keV以上の硬X線の単色光を利用し，密度や濃度の違いによる吸収差により組織形成過程を時間分解でその場観察できる手法を開発している．このような手法を用いることで，鉄鋼材料の凝固過程とそれにつづく変態の時間分解・その場観察が可能となった．さらに，時間分解でのCTにより，凝固組織の三次元的な変化をその場観察することが可能となりつつある．今後，より定量的なデータの獲得，物理モデルの構築などにより，鋳造プロセスの発展に寄与できると考える．

凝固組織形成のダイナミクス（固液共存体の変形挙動）

融液からの凝固過程では，固相の核生成・成長にともない潜熱の放出（熱輸送），固液界面での溶質分配が起こり（物質輸送），さらに濃度・温度の不均一により対流が生じる（運動量輸送）．このような結晶の成長，熱の移動，物質の移動，流体の流れといった物理現象は独立ではなく，互いに影響を及ぼしながら材料組織が形成され，濃度の不均一である偏析も発生する．これまで，デンドライトアーム間（固液共存域）の液相の流動が偏析形成の原因である前提で種々の物理モデルが構築されてきた．しかし，凝固・結晶成長過程では，凝固あるいは温度低下に伴う体積変化により固液共存領域が変形し，その結果として偏析が形成される可能性がある．X線イメージングを用いた時間分解・その場観察により，金属材料の固液共存体の変形において，固相粒子の再配列が変形を担う条件では，不均一変形を起こし，偏析形成につながることを明らかにした．観察に基づいて，変形機構の明確化，物理モデルの構築，シミュレーションへの応用を行っている．

磁場による高次配向を利用した新しい材料プロセッシング

無冷媒型超電導磁石は，長時間にわたり数T以上の強磁場を研究室でも容易に発生させることができ，このような環境では常磁性体や反磁性体に作用する力も顕在化し，材料製造プロセスに応用できる可能性がある．例えば，ミクロンスケールの微小な結晶粒子を磁場により配向させて，異方的な材料を製造できる可能性がある．結晶の配列による異方性は，材料の特性の向上や新たな機能の発現につながると考えられ，このような磁場を使った材料プロセスの原理の開発を目指している．具体的には，熱電材料や発光素子として応用が期待されているが，固相変態により形成するため融液法による単結晶育成が困難な斜方晶 β-$FeSi_2$ について，ミクロンオーダの β-$FeSi_2$ 単結晶を磁場により高次配向させ，3軸の結晶方位が揃ったバルク β-$FeSi_2$ 結晶の作製を進めている．

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．相互拡散領域では，2元系では析出物体積率の変化のみが認められたため，組成比の変化が硬度変化に直接結びついていたが，3元系では析出相の変化に起因する析出量と強度の関係の変化が認められた．熱処理時間を変化させた場合の析出組織の分布状態の変化を調べた結果，熱処理初期では焼き入れ過程で形成される組織の復元現象が，更に長時間では強化析出物の形成成長過程が進むことが示された．

MgGdZnの定速昇温条件での組織形成過程

長周期積層秩序構造を形成するMg基合金の典型例としてMgYZn 3元合金の昇温過程での組織形成を検討してきた．MgYZn合金に対する放射光での小角高角その場同時測定により，アモルファスMgYZnの結晶化直後は過飽和hcp過飽和微結晶であること，クラスタ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，MgRETM 3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．

教　授　安田　秀幸
准教授　奥田　浩司
助　教　森下　浩平

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

カゴメ格子磁性体 Co シャンダイトの特異な磁性と電気伝導

磁性遷移金属元素の Co がカゴメ格子を組む層状化合物 Co シャンダイト $Co_3Sn_{2-x}In_xS_2$ はカゴメ格子の幾何学に起因した特異な磁性や伝導現象の発見が期待できる物質である．本研究では $Co_3Sn_{2-x}In_xS_2$ の単結晶試料を育成し，その物性を詳細に調べた．その結果，キュリー温度近傍の低磁場領域で観測されたスロースピンダイナミクスを示す異常磁気相，量子臨界点近傍での（カイラル秩序に起因すると思われる）トポロジカルホール効果，$x=1$ 近傍で観測される（ディラック電子系の発現と思われる）特異な半金属的振舞，などを見出した．

クラスタ化合物 $GaMo_4S_8$ の単結晶育成と磁気相図の作成

欠損スピネル AT_4X_8 は $(AX_4)^{n-}$ と $(T_4X_4)^{n+}$ が NaCl 型に配置したクラスタ化合物であり，$(T_4X_4)^{n+}$ に不対電子がある場合磁性クラスタとなり，クラスタ軌道の高い自由度に起因する格子不安定性や磁気相関による特異な物性の発現が期待される物質群である．その中で，最近，GaV_4S_8 で Neel 型のスカーミオン格子が初めて観測され，注目を集めていた．本研究では欠損スピネルにおけるスカーミオン格子を系統的に調べる目的で，GaV_4S_8 の電子ホール対称系である $GaMo_4S_8$ の単結晶を育成し，その磁性を調べた．その結果，磁場スケールが 1 桁ほど大きいという違いはあるものの，$GaMo_4S_8$ でも GaV_4S_8 同様のスカーミオン相らしき磁場誘起相が存在することが分かった．

磁性材料の微視的評価に向けた広帯域無同調周波数高速可変 NMR スペクトロメーターの開発

微視的な磁性の情報は，磁性材料の開拓において重要である．従来簡便な方法として，メスバウア分光が用いられてきたが，観測可能核種が限られ，また放射性同位元素を使う為管理上の問題がある．核磁気共鳴法（NMR）は磁性材料に用いられる多くの元素に適用可能で有用なプローブであるが，実験上の制約から磁性材料の評価法としては一般には普及していない．本研究では，NMR を磁性材料の汎用的な微視的評価手法として適用するため，測定手順や装置回路を検討し，広帯域無同調周波数可変 NMR システムを構築した．構築したシステムを用い，広帯域の NMR シグナルを全自動で取得できることを実証した．

永久磁石材料 La-Co 置換 M 型 Sr フェライトの酸素ポテンシャル制御による高 Co 置換の合成

フェライト磁石の主流の母材は La-Co 置換した M 型 Sr フェライト（$Sr_{1-x}LaxFe_{12-y}Co_yO_{19}$）である．$Fe^{3+}$ の一部を Co^{2+} で置換することで異方性が向上し，保磁力が増大する．La^{3+} は Co^{2+} 導入の際，電荷補償のために添加されているが，最近の研究により La^{3+} の添加により Fe^{3+} の一部が Fe^{2+} に還元され，Co^{2+} の置換が阻害されていることが明らかとなっている．本研究では，酸素分圧を制御することにより Fe^{2+} の発生を抑制し Co^{2+} の置換量を増大させることを試みた．大気圧下での合成では Co の置換上限は $y=0.25$ 程度であるが，酸素 1 atm 下では $y=0.7$，超高酸素圧下では $y=1$ となり，酸素ポテンシャル制御により，Co 置換上限が劇的に増加することが明らかとなった．

固体窒素化合物を用いた希土類鉄化合物の窒化

軽元素の貫入は金属間化合物の磁性を大きく変化させる．鉄系金属間化合物では窒化がしばしば行われるが，ガス気流による窒化では，窒素量の制御が困難である．本研究では固体窒素化合物を用い，封管中で反応させることで，窒素量を制御した金属間化合物の窒化を試みた．

教　授　中村　裕之
准教授　田畑　吉計
助　教　和氣　　剛

工学研究科　材料工学専攻

材料機能学講座
材質制御学分野

・Acceleration of Electrochemical Reactions in Confined Nanospaces Caused by Surface-Induced Phase Transition （表面誘起相転移の発現に基づく拘束空間での電気化学反応の高速化）

固体表面における不均一化学反応は，材料創製・物質変換において重要である．固体表面近傍における液体の局所構造がバルクとは全く異なる．特にナノポーラス電極のナノ細孔内では，液体の局所構造が重なり合い，その領域が細孔空間内全体に及ぶため，単なる表面積の増大による反応場の拡大を凌駕する．

先行研究にて，濃度といったパラメータのある値を境として疎水性表面近傍に疎水性低分子の高濃縮相が形成され，長距離性の表面-溶質間引力が誘発される表面誘起相転移が統計力学理論的に示されている．これは，細胞内の透過膜などの生体系においては広く認識されているものの，工学分野におけるポーラス電極に適用した例はない．

ナノポーラス電極材料は，高い比表面積を活かした電気化学反応場として各種エネルギーデバイスに利用されるが，従来研究では，反応種の供給速度が低下するという課題は保留されていた．しかし，ポーラス電極の作製技術の高度化とともに，この問題が一部のエネルギーデバイスの性能を決定することが明らかとなり，液体の局所構造を制御するためのさらなる研究が求められている．本論文は，表面誘起相転移により表面近傍にのみ溶存種の高濃度領域が現れることに着目し，この領域での電気化学挙動についての実験的な基礎評価とともに，エネルギーデバイスの性能向上への応用について検証した．

まず，極微小孔径のときに，もしくはイオンサイズが最大のときに，白金錯イオンが高速で細孔内に供給され，析出反応が短時間で完了することを確認した．これらの条件は表面誘起相転移が発現すると考えられる条件と対応し，濃度勾配による拡散を凌駕する速度でナノ細孔への物質供給が進行することが明らかになった．次に，二次電池用亜鉛負極の充電過程にて問題となる亜鉛のデンドライト成長の抑制を目的とした．結果，孔径が小さいほどデンドライト析出が遅れることを実験的に確かめた．最後に，疎水性ナノ細孔に対する疎水性カチオンの高速物質供給がpH上昇にも反映されることを確かめた．

本研究の意義は，表面誘起相転移による疎水性溶質の濃縮と，誘発される長距離性引力相互作用が，ナノ細孔内における電気化学反応を高速化することを提示した点にある．一般的な濃度勾配にもとづく物質供給に依拠していては，ナノ細孔内における反応種の枯渇を防ぐことは難しいが，疎水性という要素を系に取り入れることで解決しうることを示した．各デバイスにおける電気化学反応の，表面誘起相転移に基づく高速化が今後の課題となる．また，ナノ細孔中における相転移後の液体状態を定量的にかつ実験により評価する基礎研究が必要である．

・溶媒和ヒドロニウムを用いる新規強酸性イオン液体

酸性イオン液体は酸触媒やバイオマス，燃料電池などでの応用が期待されている．本研究では，酸性のヒドロニウムイオン（H_3O^+）を溶媒和した，ヒドロニウム溶媒和イオン液体［H_3O^+·18C6］［Tf_2N^-］という新物質を合成した．ハメットの酸度関数はH_0=−4.41であり，従来の最強値（H_0=−3.6）を更新した．また磁場勾配NMR測定により求めたプロトンの自己拡散係数から，グロータス伝導機構の存在が示唆された．ヒドロニウム溶媒和イオン液体は中性分子を持たないため，従来とは異なるグロータス機構である．溶媒交換が速いことで一時的に生じる「生の」ヒドロニウムイオンが強酸性およびグロータス機構の発現に関係するのではないかと推察した．

・銅(II)-乳酸水溶液系 Cu_2O 薄膜電析浴中の錯体種

p−Cu_2O/n–ZnO太陽電池用Cu_2O電析浴は，乳酸（HL; L^-=$CH_3CH(OH)COO^-$）を錯化剤として添加した塩基性水溶液である．既存の熱力学データからは，$Cu(OH)_2$が沈殿するのだが，実際は塩基性領域でも沈殿は見られない．今回pH滴定，紫外可視光吸収スペクトル測定ならび質量分析を行った結果，溶存する未知錯体種は$Cu(H_{-1}L)L^-$と$Cu(H_{-1}L)_2^{2-}$であると結論した．$H_{-1}L^{2-}$（=$CH_3CHO^-COO^-$）は乳酸イオンL^-からα-ヒドロキシ基の水素イオンが解離したイオンである．ヒドロキシ基のpKaは一般に大きく，塩基性水溶液中でも水素イオンは解離しにくい．ヒドロキシ基がα-位にあること，ルイス酸性度の大きなCu^{2+}イオンに配位すること，ならびに濃厚溶液であることが要因であると考察した．

・電流振動波形解析による鉄の隙間腐食モニタリング

バルクの電解液に接した鉄電極をアノード分極すると，活性溶解から不動態化へ移行する電位付近では電流が自発的に振動する．電流振動発現時には，電極上に活性溶解と不動態化領域の空間伝播が周期的に発生しており，振動波形は空間的情報を含む．今回隙間鉄電極において，電流の自発振動を確認し，通常の鉄電極に比べてプロトン濃度が約4倍に上昇すること，および振幅解析から反応面積の同定に成功した．隙間腐食は目視での確認が困難な場所で発生し進行する不均一腐食である．本研究では，隙間鉄電極における電流振動の波形から，隙間内の情報をモニターできることを示した．

・ナノポーラス電極を用いた水溶液からのCo-Tb合金電析の試み

近年，鋳型を用いての電析により希土類合金ナノロッド磁性体の合成が盛んである．本研究ではナノポーラスシリコン電極を用い，Co-Tb希土類合金電析浴の電気化学挙動を詳細に調査した．孔内の反応可能容量や掃引速度を変えたボルタモグラムの結果より，ナノスケールのポーラス構造に由来した水素発生の抑制が起こったと結論した．

教　授　邑瀬　邦明
准教授　深見　一弘
助　教　北田　　敦

工学研究科　材料工学専攻

材料機能学講座
機能構築学分野

液体金属中 AFM

液体金属（溶融金属）と他の固体材料との界面は，複合材料の製造など多様な分野において，重要な役割を果たす．その界面現象は，金属結合とイオン結合あるいは共有結合との界面における現象であり，本質的な理解には，液体金属と固体との界面構造をナノスケールで分析することが必要である．本研究では，原子間力顕微鏡（Atomic Force Microscopy; AFM）を用いた液体金属－固体界面の構造分析手法を開発した．AFM は近年の技術的進展により，真空・大気中の固体表面構造のみならず固液界面構造の分析手法として注目されている．しかし，多くの AFM では Si 製カンチレバーをフォースセンサとし，変位を光てこ方式等の光学的手法で検出するため，原理上，光学的に不透明な液体金属中での AFM 動作は不可能である．本研究では，電気的に変位検出が可能な音叉型水晶振動子を用いたセンサ（qPlus センサ）を用いることで，液体金属－固体界面を分析した．

真空紫外光マイクロパターニングにより 1-hexadecene 単分子膜被覆領域と水素終端化領域を作り出した Si(111) 基板に液体金属ガリンスタン（Ga 68.5%, In 21.5%, Sn 10%）を滴下し，液滴をホルダにて固定した．ガリンスタンの表面酸化被膜除去を行い，qPlus センサによる AFM 測定を行った．

取得した表面形状像から，1-hexadecene 被覆領域ではガリンスタン中でも Si(111) 面の原子ステップを観察できた．水素終端下領域では対照的に原子ステップが得られなかった．液体金属中における固体表面構造をナノスケールで観察することに世界で初めて成功した．

酸化グラフェンの VUV アシスト化学ドーピング

グラフェンは優れた電気・電子特性から電子デバイスへの応用が期待されている．本研究では真空紫外（Vacuum Ultraviolet, VUV）光照射を用いた酸化グラフェン（GO）の光化学ドーピングを行うことで，異種元素ドープによる電子物性制御を目指した．

Modified Hummers' 法によって作製した GO の水分散液にアンモニア水を混合し，GO とアンモニア水の混合溶液（N-GO）を作製した．約 90 nm の酸化膜を形成した Si 基板に N-GO を担持し，真空チャンバー（$<10^{-3}$ Pa）に挿入した．VUV 光（中心波長＝172 nm）を64分照射することで N-GO の光還元体（N-rGO）を作製した．

XPS の C1s ピークより，光照射後は酸素含有基由来のピーク強度が減少した．高真空中での光照射によって N-GO の還元が示唆された．XPS の N1s ピークの解析により，UV 光照射では照射前後において各成分に変化は見られないが，VUV 光照射では窒素の結合様式が変化し，Pyridinic N の形成が示唆された．酸化グラフェンの光化学ドーピングに対する波長依存性が明らかとなった．

ポリオレフィン樹脂への耐有機溶剤シリカ系被覆

シクロオレフィンポリマー（Cycloolefin polymer, COP）は，可視光域で透明な飽和炭化水素プラスチックであり，ガラスの代替材料として期待されている．しかし，COP は有機溶剤耐性に問題が残されている．本研究では COP をシリカ系薄膜で被覆することで COP の有機溶剤耐性向上を目指した．

COP プレートに真空紫外（VUV）光を乾燥空気中で照射し，表面を親水化した．この COP に化学気相成長法（CVD）により Tetramethylcyclotetrasiloxane（TMCTS）を蒸着した．次に低真空（100 Pa）で VUV 光を照射し，同様に二層目の TMCTS 重合膜を成膜した．最後に，再び VUV 光を低真空で照射し，Fluoro Alkylsilane（FAS）を CVD で蒸着した．

TMCTS 重合膜に低真空で VUV 光を照射した表面の全反射赤外吸収スペクトルから，VUV 光照射後には純シリカに近い組成を持つ薄膜の形成が示唆された．二層蒸着及び FAS 蒸着を施した試料に *m*-Xylene を滴下した結果，未加工試料では存在した溶解跡や試料白濁が観察されなかった．シリカ系薄膜形成と FAS コーティングが COP プレートの有機溶剤耐性向上に寄与していることが示唆された．

平滑シリコン表面の化学活性化による高分子材料との室温接合

当研究室では，真空紫外（VUV）光照射による表面改質を利用して，シクロオレフィンポリマー（COP）同士の接着剤フリー接合や，金属（Cu や Al）基板と COP の異種材料接合に成功した．しかし，Cu や Al 基板と COP の接合においては，表面粗さとプレス温度の影響が支配的であり，VUV 光照射による表面改質が接合に与える直接的な影響は明らかとなっていない．本研究では，原子スケールで平滑な表面を持つ Si 基板にモデル表面改質状態を作製し，COP との接合強度に与える影響を調査した．

水素終端化 Si(111) 基板を，前駆体溶液に浸漬し，光励起することで，CH_3 基，COOH 基及び OH 基終端化 SAM を成膜した．作製した Si 基板を VUV 光照射した COP と貼り合わせ，室温で圧着した．各試料の表面分析および接合試料の剥離試験を行った．

試料の XPS C1s スペクトルから各 SAM に含まれる官能基由来のピークが確認できた．モデル表面改質状態が Si(111) 表面に作製できていることが示唆された．各 SAM 被覆 Si 基板と COP の剥離強度を測定した．CH_3 基終端化 SAM 試料では接合しなかった．OH 基と COOH 基終端化 SAM 試料では室温接合に成功し，試料によっては COP が破断するほどの強度が得られた．接合に関わる末端官能基の種類と量が接合強度に直接的に影響していることが示唆された．

教　授　杉村　博之
准教授　一井　　崇
助　教　宇都宮　徹

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（2017年8月現在）

博士課程学生５名(内留学生タイ,台湾から各１名)，修士課程が13名（内留学生　インドネシア２名，タイへ留学各１名），学部学生６名．研究生１名（インドネシア）にスタッフ５名を加えて総勢30名（内女性８名）．６，７月にはタイから短期留学生が３名，10月から中国から留学生が来る他，タイの研究者が短期滞在し，研究室内のセミナーも英語で行うなど，グローバルな環境の下，研究を行っている．

最近の研究から

2017年３月に学位を取得したKim Jungryang君の研究について紹介する．

本研究は，グラファイトと類似した層状物質の一つである六方晶窒化ホウ素とリチウムのインターカレーション反応について調べたものである．その概要は次のようにまとめられる．

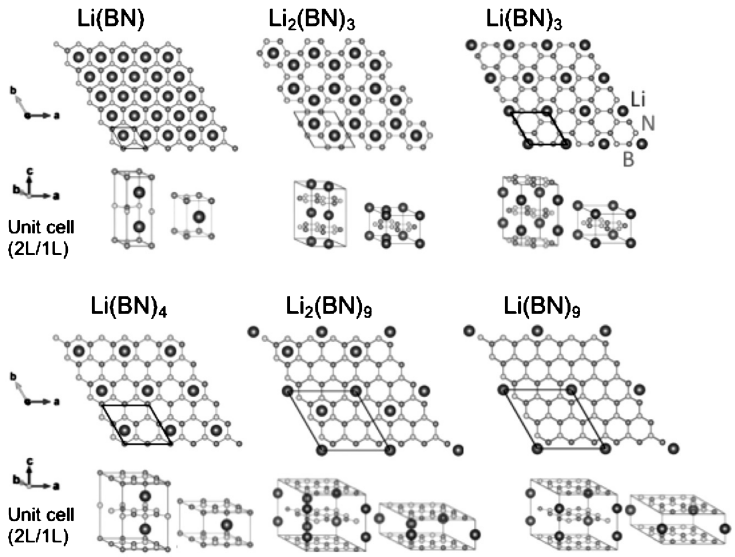
1）これまで，窒化ホウ素とリチウムとのインターカレーション反応には高温かつ長時間必要であった．本研究ではメカニカルミリングと熱処理を組み合わせることにより，700℃ ２時間という比較的低温短時間で反応が生じることを示した．

2）リチウム窒化ホウ素層間化合物の安定性を調べるために，リチウムとグラファイトと窒化ホウ素をメカニカルミリングにより混合物質を作り，熱処理により反応させた．その結果，ミリング直後にはリチウムグラファイト層間化合物が生じていたが，熱処理を施すと，リチウムがグラファイトから窒化ホウ素に移動し，リチウム窒化ホウ素層間化合物が生じた．この結果は，リチウム窒化ホウ素層間化合物がリチウムグラファイト層間化合物よりも熱的に安定であることを示した．

3）リチウム窒化ホウ素層間化合物を電気化学的に合成し，その反応電位を調べた．その結果，窒化ホウ素系の方がグラファイト系よりも安定であり，反応電位は約 1.0 V (vs. Li/Li^+) であった．しかし，窒化ホウ素が絶縁体であるため，反応が一部に留まり，全てを反応させることは困難であった．

4）リチウム窒化ホウ素層間化合物の構造と安定性について，第一原理計算ならびにX線回折図形のリートベルト解析により詳細に検討した．窒素とホウ素が秩序を有して配列しているのに比べて無秩序に配列している方が安定であり，実験で得られた化合物は $Li(BN)_9$ が最も可能性のある構造であることを示した．

教　　授　石原　慶一
准 教 授　奥村　英之
研 究 員　レオン　愛
技術職員　竹本　庸平



考えられるリチウム窒化ホウ素層間化合物の構造

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

当研究分野では，光を利用したエネルギー変換システムに関する研究を行っており，有機分子および/あるいは無機半導体で構成される構造に光を照射したときの，励起状態から基底状態に戻る緩和過程での発光，発電，あるいはそのほかの仕事を高効率に引き出すような新材料およびプロセスを設計し，エネルギー変換デバイスへの応用を検討している．現在までの進展を以下に示す．

有機－無機ハイブリッド太陽電池の界面制御

色素増感太陽電池，有機薄膜太陽電池，あるいは有機金属ハライドペロブスカイト型太陽電池は，既存のシリコン系太陽電池と対比して部材の重量が格段に軽量であることから，太陽光発電が可能な新しいプリンタブル電子デバイスの一つとして注目されており，簡便かつ安価で作製できるプロセスの開発が多くの研究者らによって進められている．さらに，光電変換効率向上やデバイスの長寿命化が検討され，現在では，単位重量当たりの発電量に関して，市場の90数％を占めるシリコン系太陽電池の十数倍に至るものまで得られるようになった．当研究分野においても，有機―無機ハイブリッド太陽電池用材料及びそれら薄膜を作製するためのスプレー法やファインチャネルミスト蒸着法，あるいは電界紡糸法などのプロセスを開発すると共に，薄膜デバイスの種々の有機材料と無機材料の接合を巧みに工夫することを検討してきた．すなわち，

(1) 有機薄膜太陽電池におけるバルクヘテロ接合の作製にファインチャネルミスト蒸着法を利用すると，光電変化特性に関するp-n接合の最適化を迅速化できることを示した．
(2) 電界紡糸法によるTiO_2や$SrTiO_3$などの金属酸化物ナノファイバーや，ポリ（3-ヘキシルチオフェン）などの導電性ポリマーナノファイバー，あるいはポリメタクリル酸メチルとポリアクリロニトリルのコア/シェル電界紡糸ファイバーを焼成した中空カーボンファイバーを作製し，色素増感太陽電池や有機薄膜太陽電池用の電子輸送材料などへ応用し，短絡電流密度の向上に伴う変換効率の増大を確認した．
(3) 導電性ポリマーと金属酸化物間の界面制御について，太陽電池の光電変換特性のみならず，キャリアの移動度，寿命，材料の結晶性，欠損，バンドギャップ，空乏層の厚み，電子密度，界面双極子モーメント，表面濡れ性，粗さ，等の観点からも多角的に考察し，素子性能の向上に重要な因子を解明してきた．とりわけ，有機―無機ハイブリッド太陽電池における金属酸化物ZnOナノ粒子の表面に分散材として色素を導入すると，導電性ポリマーとの接合が改善して電荷分離効率が向上し，変換効率が向上することや，ナノ粒子間の抵抗が効率低下に影響を及ぼすことを示した．さらに有機金属ハライドペロブスカイト型太陽電池へのZnOナノ粒子の応用と最適化も行った．
(4) 金属硫化物の固溶体であるAg-In-Zn-Sからなる直径4～6 nmの均質に分散した量子ドットを作製し，Ag及びInとZnとの組成比を変えたり，オレイルアミンやピリジン等の分散剤を置換したりすることで価電子帯と伝導帯の値が変化し，バンドギャップ調整が可能であることを示すと共に，有機－無機ハイブリッド太陽電池を構成する各材料のエネルギーダイヤグラムに合致するように，ある特定の波長を選択的に吸収する量子ドットを適用し，量子収率増大と光電変換効率向上を実現した．
(5) p-i-n接合素子のi層に硫化アンチモンを選定し，高純度化によりホール移動度が改善して電流密度が増大すること，電子輸送層に用いた酸化チタンの最適化により開放電圧が増大することを見出すと共に，p層，i層およびn層の各層を最適化することで，耐光試験において初期性能の90％以上を保持できる長寿命化を実現した．

中赤外自由電子レーザーによる格子振動の選択励起

半導体を用いた，個々のフォノンの選択的励起による，特定の格子振動が及ぼす電子状態への影響・相変化や電荷移動の積極的な制御の可能性を模索する研究を継続中である．波長可変な中赤外自由電子レーザーKU-FEL（京都大学エネルギー理工学研究所）によって光学的（非熱的）に直接的なフォノン励起を行い，さらにアンチストークスラマン散乱測定法を用いてフォノン選択励起を観測するとともに，ハイパーラマン散乱，高次の過程の観測等により，このフォノン分光法の適用範囲を拡げるべく模索している．多様な構造-機能相関のみられるペロブスカイト型の，無機および有機－無機ハイブリッド化合物における，振動モード励起と特定フォノン励起による物性の発現メカニズムの解明のため，$SrTiO_3$(STO）と有機金属ハライドペロブスカイト（$MAPbI_3$）を対象とした研究を行っている．また，高次の過程への適用範囲の拡大を目指して，ワイドギャップ半導体のひとつにおける二光子励起に新たに挑戦中である．

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，優れた耐摩耗性も期待できる．

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ため，光学素子への応用が期待されている．そこで，ZnO の温度による溶解度差を利用した水溶液プロセスによって p 型 GaN 基板上へのヘテロエピタキシャル成長を試みた．反応溶液の pH，添加剤濃度，GaN 基板の表面状態を制御することで，GaN 基板上へエピタキシャル成長した緻密な ZnO 膜を得られることが明らかとなった．得られた，ZnO 膜は n 型伝導性を示し，p 型 GaN 基板との接合で整流特性を示した．

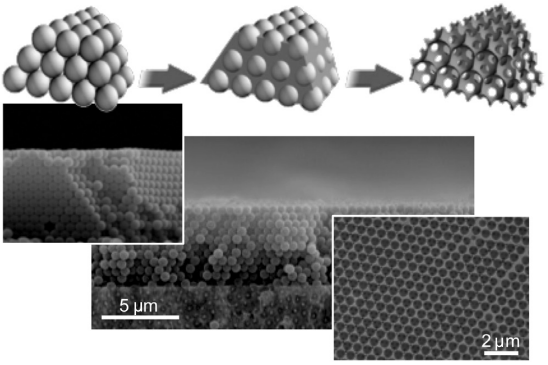
ミスト CVD 法による薄膜成長

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

太陽電池の光吸収層として期待される p 型の Cu_2O と Cu_2ZnSnS_4 については，ミスト CVD 法で高い結晶性と電気特性を有する膜を実現した．今後，デバイスへの応用が期待できる．また，Cu や Ni の金属単体，Mo_2C や β-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，$CH_3NH_3PbI_3$ や電荷輸送層となる NiO をミスト CVD 法で作製し，6.1％の変換効率を有する太陽電池を実現した．

三次元フォトニック結晶の作製

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



教　授　平藤　哲司
准教授　三宅　正男
助　教　池之上卓己

エネルギー科学研究科　エネルギー応用科学専攻

エネルギー材料学講座
プロセス熱化学分野

Ca_2SiO_4-$Ca_3P_2O_8$固溶体中のP_2O_5活量と耐火物成分MgOの固溶度

1．緒言

溶鉄脱リンの反応生成物P_2O_5はCa_2SiO_4-$Ca_3P_2O_8$固溶体（図1(a)，<C_2S-C_3P>ssと表記）中に固定されることが知られている．1573 KでのCaO-SiO_2-P_2O_5系状態図によれば，<C_2S-C_3P>ssは高塩基度域でCaOあるいはCa_3SiO_5と，低塩基度域で$CaSiO_3$と共存する．当研究室ではこれまでに<C_2S-C_3P>ss中のP_2O_5活量を高塩基度域で測定した．本研究では，<C_2S-C_3P>ss＋$CaSiO_3$二相共存領域において<C_2S-C_3P>ss中のC_3P濃度を変化させ，P_2O_5活量を測定した．また，<C_2S-C_3P>ss中への耐火物成分MgOの固溶度を見積もった．

2．実験方法

Ar＋12％H_2ガスを313 Kに保持したLiCl飽和水溶液中へ吹き込んでAr＋H_2＋H_2O混合ガスとした．混合ガスによりH_2分圧P_{H_2}とH_2O分圧P_{H_2O}を一定に制御した反応管内で<C_2S-C_3P>ss＋$CaSiO_3$二相共存スラグと{Cu-P}液体合金を1573 Kにおいて平衡させた．平衡反応式は次式で表される．

$$2[\mathrm{P}]_{\mathrm{Cu}} + 5\,\mathrm{H_2O} = (\mathrm{P_2O_5})_{\mathrm{slag}} + 5\,\mathrm{H_2} \quad \cdots\cdots(1)$$

$$\log K(1) = \log a_{P_2O_5} - 2\log h_P + 5\log[P_{H_2}/P_{H_2O}] \quad \cdots\cdots(2)$$

{Cu-P}液体合金中のP濃度$[mass\%P]_{Cu}$が希薄なとき，P活量h_Pは$[mass\%P]_{Cu}$に等しく，その平衡値とガス分圧を式(2)に代入してスラグ中のP_2O_5活量$a_{P_2O_5}$を算出した．

3．実験結果・考察

<C_2S-C_3P>ss中の$(SiO_4)^{4-}$と$(PO_4)^{3-}$の置換率をYとし，$a_{P_2O_5}$とYの関係を図2に示す．C_3P濃度が高くなるほど$a_{P_2O_5}$は上昇し，高塩基度域での既報値よりも7桁程度高い値となった．<C_2S-C_3P>ssに準正則溶体モデルを適用した．

$$RT\ln a_{C_3P} = \Delta G_{t,\,C_3P} + 2RT\ln Y + 2a(1-Y)^3 + 2b(1-Y)^2 \quad \cdots\cdots(3)$$

$$RT\ln a_{C_3S} = \Delta G_{t,\,C_2S} + RT\ln(1-Y) - aY^3 + (3a/2+b)Y^2 \quad \cdots\cdots(4)$$

ここで，ΔG_tは相変態のGibbsエネルギー変化を示す．1573 KにおけるP_2O_5活量の本実験値および既報値を用いて式(3)，(4)中のパラメータa, bを最適化し，次式を得た．

$$\log a_{C_3P} = 2\log Y - 2.55(1-Y)^3 + 1.49(1-Y)^2 \quad \cdots\cdots(5)$$

$$\log a_{C_2S} = 3.76\times10^{-2} + \log(1-Y) + 1.27\,Y^3 - 1.16\,Y^2 \quad \cdots\cdots(6)$$

図1(b)中の実線は式(5)，(6)から求めた計算値を示す．$a_{P_2O_5}$の計算値を図2中に実線および破線で示すが，計算値は実験値をよく再現していると言える．また式(5)，(6)から<C_2S-C_3P>ss＋$CaSiO_3$二相共存領域におけるCaO活量とSiO_2活量も算出可能であり，これらの計算値はCaO-SiO_2二元系での活量と矛盾しなかった．

<C_2S-C_3P>ss中へ耐火物成分MgOが固溶する場合，CaOとMgOが置換すると考えた．<C_2S-C_3P>ssがCaOおよび耐火物MgOと共存するとき，<C_2S-C_3P>ss中のMgO濃度は0.05～0.07 mass%と見積もられた．この値は，転炉スラグに含まれる<C_2S-C_3P>ss中のMgO濃度の報告値0.1 mass%と同程度であった．

准教授　長谷川将克

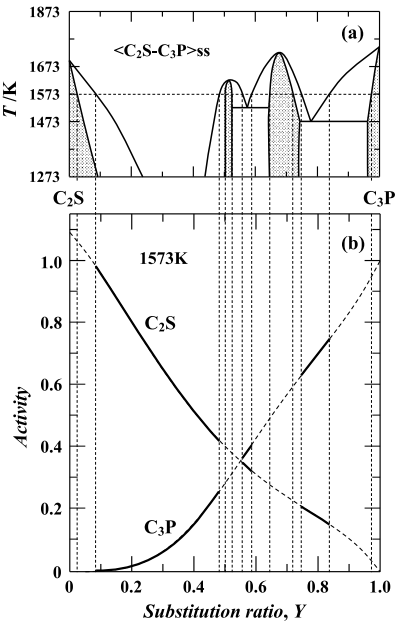


図1　(a)Ca_2SiO_4-$Ca_3P_2O_8$擬二元系状態図
(b)1573 Kにおける活量曲線（計算値）

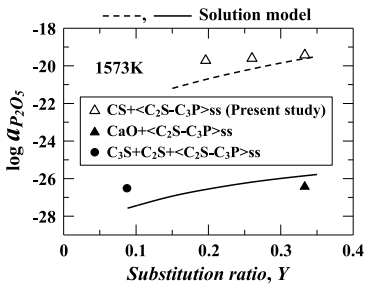


図2　1573 KにおけるP_2O_5活量と置換率Yの関係

エネルギー科学研究科　エネルギー応用科学専攻

エネルギー材料学講座
エネルギー応用基礎学分野

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

希土類系銅酸化物超伝導物質は液体窒素（沸点：77 K）で冷却するだけで電気抵抗ゼロの状態となる画期的な超伝導物質であり，その実用化が進められている．しかし，実用的レベルのゼロ抵抗電流を流せる高性能超伝導線を実現するには，電線内部の超伝導物質の結晶方位をすべ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，{100}<001>集合組織を有するFCC金属テープや{100}<001>集合組織を有する珪素鋼板をテンプレート基材として使用する超伝導線を世界に先駆けて提唱し，低コスト超伝導線の研究開発を先導している．本稿では，{100}<001>集合組織Cuテープを用いた高温超伝導線の研究開発の進捗について述べる．

図1にNiメッキした{100}<001>集合組織を有するCuテープ［Ni(Cu)］上にレーザー蒸着法を用いて導電性Nbドープ$SrTiO_3$(Nb: STO)中間層および$YBa_2Cu_3O_7$(YBCO)超伝導物質を成長させた試料の断面組織写真を示す．(a)と(b)では導電性中間層の層厚を変化させている．YBCO超伝導層の成膜は酸化性雰囲気で行われるため，図1(a)のように導電性中間層が薄い場合，Nb-STO/Ni界面に酸化物の生成（図中の矢印部分）が起こってしまう．しかし，導電性中間層の厚くすることで，この界面の酸化を抑制することができることがわかった．この成果は，送電時に超伝導状態が破れても，導電性中間層を通じてCu基材に回避電流を流せることを意味し，低コスト超伝導線製造に向けた新しい線材構造の可能性を示した．

磁場を用いた希土類系酸化物超伝導物質の三次元結晶配列技術

多くの機能性材料ではその特性が結晶方位に強く依存するため，結晶方位制御を適切に行うことによって機能性の飛躍的向上が期待できる．しかし，バルク単結晶，薄膜単結晶などで使われるエピタキシャル成長技術以外の結晶方位を揃える技術はあまりない．当研究室では新しい結晶配向制御法である変調磁場を使った「2軸結晶配向」に関する研究にも取り組んでいる．

変調磁場の一つである間欠回転磁場は，180度ごとに静止と回転を繰り返す磁場である．静止工程で磁化容易軸が，回転工程で磁化困難軸が配向し2軸が固定されることで，結果的に3結晶軸を揃えた結晶配列が実現する．また，永久磁石の100～1000倍の磁力を発生する10テスラ級超伝導電磁石を用いることで，通常非磁性と呼ばれる弱磁性物質も対象物質となる．

図2に，双晶構造をもち磁場配向に不利とされる$(Y_{1-x}Er_x)Ba_2Cu_3O_7$酸化物超伝導物質粉末をエポキシ樹脂中に分散させ，室温で10テスラの変調磁場下で配向させた粉末配向体試料の(103)極図形を示す．いずれも明瞭な4回対称性を有するスポットが得られたことから，双晶を含み結晶粒レベルでの磁気異方性が消失する可能性のある結晶粒子でも2軸結晶配向が実現できることがわかった．一方でx＝0.5の場合，回転角方向のストリークが抑制され，化学組成によって配向度が異なることが示唆された．今後，希土類イオン種や磁場印加条件の最適化などを進め，原理証明レベルから高温超伝導線材や機能性セラミックスの新しい製造プロセスの確立に向けて研究開発を進める．

教　授　土井　俊哉
准教授　堀井　　滋

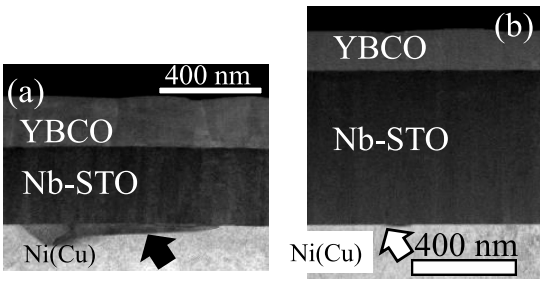


図1　異なるNb-STO層厚をもつ超伝導線の断面組織．

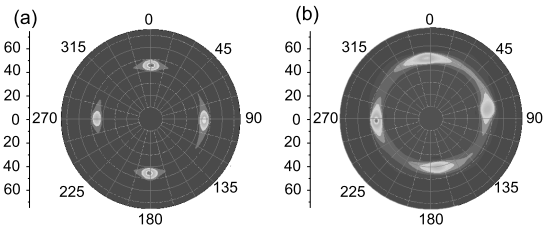


図2　(103)極図形測定結果．
(a) $(Y_{0.5}Er_{0.5})123$, (b) Er123.

平 成 29 年 度 水 曜 会 大 会

●日　時　平成29年６月３日(土)　11:00～16:30
●会　場　京都大学吉田キャンパス工学部物理系校舎

６月３日(土)に平成29年度水曜会大会が開催されました．京都大学本部構内の工学部物理系校舎にて午前に研究室紹介のポスター展示，午後から懇親会，総会，特別講演会が行われました．今回は学生の参加も多数あり，約90名の方々にご参加いただきました．

工学部物理系校舎２階廊下にて各研究室紹介のポスター展示と質疑応答が約１時間行われた後，同校舎214･215セミナー室にて懇親会が開催されました．田中功教授の司会のもとで，石田毅会長の挨拶の後，村上陽一郎先生に乾杯のご発声をいただきました．しばらく歓談の時間が続いた後に，新任・昇任教員からの自己紹介もあり，和気藹々とした雰囲気の中，河合潤教授の閉会の辞とともに盛会のうちにお開きとなりました．その後，物理系校舎の前で記念撮影が行われました．

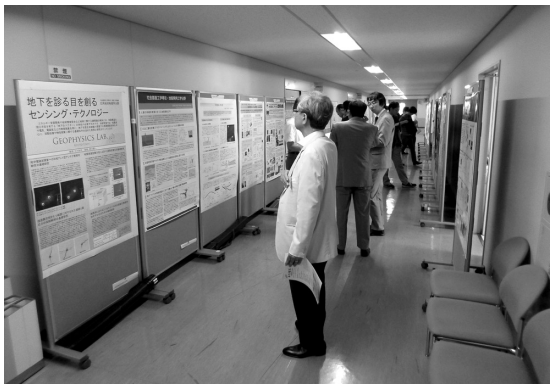
総会は，315講義室に会場を移して行われました．まず，小池克明教授の司会のもと石田毅会長より平成28年度の事業報告がありました．次に，田中功教授による会計報告，宇田哲也教授からの監査報告がなされ，いずれも承認されました．続いて次期役員推挙により，新会長に河合潤教授が選出された後，新会長が挨拶され，抱負などを述べられました．その後，同会場で以下３件の特別講演が行われました．

「三菱マテリアルグループの資源事業について」
三菱マテリアル株式会社　代表取締役副社長執行役員　小野　直樹　氏

「環境調査社会の実現を目指す製鉄技術開発－見える化によるイノベーション－」
新日鐵住金株式会社　顧問　上島　良之　氏

「自動車鋼板を取り巻く環境変化と研究課題」
JFEスチール株式会社　スチール研究所　理事　表面処理研究部門部長　長滝　康伸　氏

来年度は，平成30年６月２日(土)に京都大学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．


地下を診る目を創る
センシング・テクノロジー
GEOPHYSICS LAB.

平成二十九年度

2.水曜会誌
平成28年度は1回発行
第24巻第9号 平成28年10月31日
発行部数 2700冊
3.名簿発行
隔年発行 28年度は 700部発行

三菱マテリアルの資源事業戦略
2017年6月3日
三菱マテリアル株式会社
取締役 副社長執行役員
小野 直樹
MITSUBISHI MATERIALS

環境調和社会の実現を目指す製鉄技術開発
ー見える化によるイノベーションー
2017年6月3日
新日鐵住金(株) 上島良之

自動車用鋼板を取り巻く環境変化と
研究課題

平成28年度 水曜会会計報告

平成29年 3 月31日現在
（単位：円）

収　　入		支　　出	
前年度繰越金	5,633,756	会誌印刷代（製版・封筒・郵送料込）	
会　　費	4,044,000	24巻 9 号	1,166,975
会誌広告掲載料（製版代込）		名簿印刷代（製版・封筒・郵送料込）	
24巻 9 号	696,740	平成28年11月発行	2,502,053
名簿広告掲載料（製版代込）		水曜会大会経費（28年 6 月 4 日）	1,031,957
平成28年11月発行	521,420	会 費 返 戻	3,000
名 簿 売 上	833,000	編集委員会経費（ホームページ代含む）	141,588
会 誌 売 上	3,176	会誌原稿料	20,000
水曜会大会懇親会費	231,000	通　信　費（切手，後納郵便料）	57,222
預 金 利 息	386	会費等振込手数料	147,206
物理工学科同窓会	112,747	事務人件費	1,071,160
		PC・プリンタ・封筒・文具代等	26,479
		物理工学科スポーツ大会援助	129,027
		小　　計	6,296,667
		次年度への繰越金	5,779,558
		内訳　銀行普通預金	3,243,790
		銀行定期預金	2,500,000
		郵便振替預金	10,348
		手 持 現 金	25,420
収　入　合　計	12,076,225	支　出　合　計	12,076,225

上記の通り会計報告いたします.
平成29年 6 月 3 日
会　計　幹　事　　辻　　伸　泰
以上の通り相違ございません.
会計監事(監査)　　宇　田　哲　也

会 報

京都大学大学院工学研究科教授　朝倉俊弘先生は定年退職されました.

朝倉俊弘先生のご略歴

朝倉俊弘先生は，昭和49年３月に京都大学工学部資源工学科をご卒業の後，京都大学大学院工学研究科修士課程に進学され，昭和51年３月に同課程を修了されました．同年４月に日本国有鉄道にご就職され．爾来，鉄道トンネルの建設と保守に係る研究開発に携わられ，昭和62年４月の日本国有鉄道の民営化・分割に伴い，財団法人鉄道総合技術研究所の所属となれてからも研究者として実績を積まれ，その成果により，平成9年3月には「山岳トンネルの変状メカニズムとその対策に関する研究」によって京都大学工学博士の学位を授与されておられます．

平成11年10月に京都大学大学院工学研究科の助教授にご任官となり，資源工学専攻地殻開発工学講座資源高度利用工学分野に所属して，教育者としての道も歩み出されました．平成15年４月の地球系改組に伴い，工学研究科社会基盤工学専攻地殻工学講座地殻開発工学分野の所属となられ，その後，平成16年５月に京都大学大学院工学研究科教授に昇任，社会基盤工学専攻地殻開発工学講座ジオメカトロニクス分野ご担当となられました．専攻再編に伴う分野名変更により，平成22年４月からは社会基盤工学専攻資源工学講座計測評価工学分野担当として教育・研究に携わって来られました．

京都大学にご奉職以来，学内においては，学生の教育と研究者の指導にあたられ，多くの人材を育成されるとともに，平成23年４月より同24年３月まで地球工学科長も務められました．学外においては，山口大学客員教授，大阪大学非常勤講師を務められるとともに，岩の力学連合会副理事長，材料学会理事，資源・素材学会理事，土木学会トンネル工学委員会委員，同岩盤力学委員会委員，同会誌編集委員会委員，同論文集編集委員会委員の他，整備新幹線トンネル，高速道路トンネルに関わる各種委員会委員等を務められました．また，海外においても，大韓民国ソウル地下鉄，同国プサン地下鉄，フランス・イタリア間アルプストンネル，中華人民共和国大瑤山トンネル，中華民国北廻鉄道改良計画，同国南廻鉄道改良計画，同国ダム排砂トンネル等の技術指導にあたられ，国際的な技術協力と

国際親善に寄与して来られました.

朝倉俊弘先生は，40年にわたって一貫してトンネル工学に関する研究に従事され，学術的な業績のみならず実務に則したその成果は，国内外を問わず高く評価されているところであります．とくに先生は，トンネル工学における重点が，否応なしに建設技術から維持管理技術へと移行することを予見されて，総延長２万キロにも及ぶ我が国のトンネルが抱える維持管理上の様々な問題に関して，その発生メカニズムの解明と効果的な対策工法の策定に取り組んで来られました．それらの成果は，先生が委員長を務められた委員会「トンネルの変状メカニズム」の成書（土木学会，平成15年発行）としてまとめられています．また，新規のトンネル建設に対しても，起工されたリニア中央新幹線の南アルプストンネルの建設などを始め，研究と実務の両面にわたる豊富な経験に裏打ちされた多くの的確な助言を提示しておられます.

以上のように，朝倉俊弘先生は，トンネル工学の研究において指導的役割を担って来られてだけでなく，トンネル建設とその維持管理技術の実際的発展にも，これまで多大な貢献をなされて来られました.

ここに研究室および卒業生を代表するものとして，これまでの先生のご指導に厚く感謝申し上げるとともに，先生が今後ともご健勝にて益々ご活躍されますことを心よりお祈り申し上げる次第です.

塚田和彦
（計測評価工学分野　准教授　昭和55年卒）

朝倉先生のご退職に寄せて

小　林　寛　明

平成24年の秋ごろ，突然，ある上司から私に電話があり，「来年度から京都大学朝倉研究室に助教として出向しないか．明日までに返事をしろ.」という話がありました．もちろん朝倉先生のことは存じ上げておりましたが, なぜ私が？という思いが先に立ちました．一方で，機構に身を置く者として，大学で働きながら朝倉先生に師事できるこのような機会は大変貴重で，ありがたいことですので，喜んでお受けしました.

４月になり，初めに取り組んだのは青函トンネルで行われている計測についての研究でした．青函トンネルの研究を通して先生とお話しすると，NATM 創成期に試行錯誤し，技術開発をしながら長大海底トンネルに挑んだ方々のことを教えていただき，機構の前身である鉄道公団の諸先輩方の挑戦を誇りに思うのと同時に，現在の我々，若手技術者のチャレンジ精神の奮起を期待されているのを感じました.

私の研究テーマの立案には，お忙しい中，幾度となくお時間を取っていただきましたが，ようやく，これといったものをご提案できた際には「やっと私が言いたいことが分かったね.」とおっしゃいました．先生が実務者である私に伝えたかったことは，研究は実際の現場で課題となっていることを解消し，現場で活かされなければならない, ということだと思っております.

そのため先生は，トンネルの施工現場や維持管理現場の調査には学生を同行させ，学生や事業者側の技術者の区別なく，経験に裏打ちされた「トンネル現場でのモノの見方」を伝授されていました．私も聞き漏らすまいと必死にメモを取りまして，私にとってその野帳は今も見返す貴重な財産になりました.

私が在籍したのは１年間と短い期間ではありましたが，私のキャリア形成に非常に大きな影響を与えました．「過去の失敗を学び今に活かし，将来に禍根を残すような構造物を作ってはいけない」という先生の想いを肝に銘じ，トンネル屋の端くれに身を置くことができるよう, これからも精進したいと思っております．先生には改めて御礼申し上げるのとともに，引き続きご指導いただければ幸甚に存じます.

（鉄道建設・運輸施設整備支援機構　元助教）

朝倉先生，ありがとうございました

宇津木　慎　司

朝倉先生，本当にありがとうございました.

先生と初めてお会いしたのは，約10年前であったと記憶しています．私の学生時代，資源工学科在学時の恩師，菊地宏吉先生に紹介していただき，それがご縁で2009年から３年間，朝倉研究室に博士課程の「おっさん学生」として在籍させていただきました．菊地先生から学生時代に教えていただいた，土木工事における地質工学の係わりについて，建設会社において約15年間，現場や種々の実務で培った内容を博士論文にまとめる過程で，先生から本質を突く多くの指摘をいただきました．また，博士号取得後も定期的にお会いして，その時々に，具体的な技術的課題について，そして技術者，社会人としてのあり方についてなど，小生が抱える悩みに対して，常に適切なご助言で励ましていただきました.

先生からのご指導の中で，何よりも「社会の役に立つ研究，仕事をすることが大事」，これは菊地先生も常々おっしゃっていたことですが，今この年になり，改めてその重要性を認識しています．そして「明るく，厳しく」，先生の周りにはいつも笑顔がありますが，ゼミや個別にご指導いただく際，本当に親身になって

思いや考えを伝えてくださる，この手法をいつも真似させていただいております.博士号を取得した際にも，真っ先に，「後進の指導を頼む」という言葉をいただきました．これらの教えを忘れずに，先生のような研究者，技術者に少しでも近づけるよう精進していく所存ですし，若い人達にも技術そのものや技術者としてのあり方をしっかり継承していきたいと思います.

朝倉先生，本当にありがとうございました．今後も温かく見守ってください.

（株式会社安藤･間　平成４年卒）

朝倉俊弘先生のご退職に寄せて

御　崎　哲　一

私が朝倉先生にご指導いただくようになったのは，社会人ドクターとして13年ぶりに大学に戻った博士課程からでした．朝倉先生とは，資源工学科の大先輩でいらっしゃいますが，それだけではなく，当社のトンネルワーキングなどでトンネルの維持管理・修繕についてのご助言を頂く等のお付き合いがあったこと，また，学生時代の恩師や先輩からのご支援などがあったことなど，本当に色々なご縁に恵まれて博士課程に進むことができましたのは，私にとって本当に幸いなことでした.

研究室に入って，朝倉先生からご指導いただいたことは，「社会インフラにかかわる仕事をしているのであれば，安全を第一に考えなければならない．安全はそこにあるものではなく，日々努力し積み重ねることによってしか成しえない.」ということです．その一環として，様々な箇所の現場見学会を催され，私も社会人ドクターでありながら，１人の学生として，現場に行かせていただいたことは，非常にありがたいことでした.

博士論文に関して，私のテーマはトンネル覆工をレーザーで検査する，というものでしたが，朝倉先生には，トンネルの維持管理の様々な課題・観点から，より質の高い検査へ変革するため，現状の検査方法に加え，労力のかからない非破壊検査方法が必要とされること，そのための技術として，本研究の進むべき方向をご指導頂くとともに，ご鞭撻を賜りました．なかなか装置が完成せず，データ取得もままならなかった時，「研究は完成させるばかりではない，途中経過であってもその段階で学術的にまとめれば良い」とおっしゃっていただき，苦労していたときも温かい目で見守って頂いていました．この言葉のおかげで，試験装置完成後すぐに取得したデータで，何とか博士論文を取りまとめられたのだと思います．心より深く感謝申し上げます.

ご退職後も，引き続きリニア中央新幹線などの長大トンネルのプロジェクトにご尽力されると聞き及んでおります．また，当社においてもトンネルの維持管理に関するご助言を頂けるとのことで，私はトンネルの維持管理に携わる者として，朝倉先生のご見識，お知恵を少しでも引き継げるよう努力いたしますので，今後も引き続きご指導・ご鞭撻の程，宜しくお願い致します.

（西日本旅客鉄道株式会社　平成９年卒）

朝倉先生のご退職に寄せて

嶋　本　敬　介

朝倉先生と私とは，大きく分けると３つの繋がりがあります．１つ目は大学4回生の時から始まった，先生と教え子という関係，２つ目は，先生が京都大学の前に在籍されていた鉄道総合技術研究所に私が就職したためにできた，先輩と後輩という関係，３つ目は私が鉄道総合技術研究所に就職した後，２年３か月間，朝倉研究室の助教をさせていただいた時の上司と部下という関係です．その他にも，私が先生と同じトンネルという分野に携わっているため，様々な場面で現在でも関わりがあり，先生の存在なくして今の私はありません.

先生は，温和でユーモアがあり，時に厳しく，基本的には優しい方です．鉄道総合技術研究所に入って，私が朝倉先生の研究室の出身だというと，皆，穏やかな顔になり，朝倉先生との楽しい思い出を話してくれたりしました．朝倉先生の性格のお陰で，私の職場人生も円滑に進んだものと思います.

先生は何かとうまくこなされるのですが，中でも，いつも私が素晴らしいと感じる場面は委員会です．先生は，様々な委員会の委員長等を務められ，私も末席に入ることもあるのですが，そういった場面での先生の視点の鋭さ，進行の仕方，まとめ方，配慮の仕方を拝見するにつけ，いつも大変勉強させていただいております.

先生は学協会活動や受託研究等の学外の活動も多くされており，大変お忙しかったのですが，学生との時間も大切にされていました.研究室の飲み会や旅行会，遠足等にも欠かさず参加され，学生とのコミュニケーションを楽しまれていました．また，ゼミの時間も大変大事にされており，学生には，その研究成果をどのように社会に活かせるのかまで考えさせる指導をされていました．私も，ともすると自己満足な研究に陥りがちでしたが，何度も軌道修正していただきました.

先生は，鉄道総合技術研究所の前身の国鉄技術研究所の時代には，トンネルの建設現場で先駆的な現地計測等を多数実施し，成果を取りまとめて指針を策定され，日本における NATM の導入，発展に大いに貢献されました．また，維持管理の時代になっていくにつれ，変状トンネルの維持管理の研究というこれまでなかった分野に先駆的に着手され，今日でも改訂に着手できないほどに高い完成度でマニュアルとしてまとめられました．（早く改訂しろと先日もお叱りを受けました．）すなわち，先生はトンネルの建設についても維持管理についてもどちらについても実務的，研究的に精通されています．近年は，維持管理を考慮した建設が求められる時代になっており，先生のような方が大変貴重な人材であります．その朝倉先生にトンネルを学べたということは，大変幸せなことであったと，主に就職してから感じました．

このように，これまでの先生からいただいたご指導やご厚情を思うと感謝の念に堪えません．ご退官後も引く手あまたで，益々ご活躍のことと思います．今後も大変お忙しいことかと思いますが，末永いご指導，ご鞭撻の程，よろしくお願い申し上げます．

（鉄道総合技術研究所　元助教　平成17年卒）

朝倉先生ご退職に寄せて

前　田　龍　一

朝倉先生には大学の 4 回生から修士課程の修了までの 3 年間の研究生活においてご指導いただきました．研究について，何もわからない私を最後までご指導いただき，社会に送り出していたことに感謝しています．

研究室では特に記憶に残っているのは，研究室のゼミ発表です．隔週で行われていたゼミ発表では，私は朝倉先生から毎回厳しいご指導を頂きました．１つのアウトップされた数値に対し，実現象を踏まえた数値の意味や，理論との一致性など様々な角度からの朝倉先生の経験や技術力に基づくご指導がありました．冷や汗をかきながら毎回過ごした事を今でも覚えています．学生の私は，それらのご指導に対し十分理解出来ていない部分がありました．現在社会に出て，ようやく少しずつではありますが，あの時のご指導の意味が分かってきた気がします．ご指導の中で，山岳トンネルと立ち向かう時の心構え，社会において困難に出会った時に何を考えるべきなのかを教えていただきました．特に実現象をよく観察しなければならないというご指導は，山岳トンネルの現場に行く際は必ず心がけています．また，山岳トンネルの現場だけでなく，他の現場に携わる時や，社会生活全般にわたり，私自身の考えや行動の基となっています．あの時もっとたくさんの事を「聞いていれば」・「考えていれば」と思うことがたくさん有り今更になって悔やんでいます．今後も朝倉先生に頂いた様々なご指導を胸に，日々精進していきたいと思っております．

また，この 3 年間の研究生活の中で，朝倉先生のご配慮で，私たち学生を実際に施工が行われているトンネルの現場や研究施設の見学を何度も連れて行って頂きました．山岳トンネルや土木技術のスケールの大きさを自分の肌で感じられる経験をさせて頂き，その中で，自分自身の研究が現場の何に役立っているのか，何が問題なのかを考えさせられました．そして，現在の土木技術者として社会に出る事のきっかけとなったと思っております．学生時代に現場を見る貴重な機会を与えて頂いた事にあらためて感謝を申し上げます．

この様な，研究生活でしたが，節目の機会においては研究室のメンバーや先生たちを交えての打ち上げや飲み会等もあり，楽しむ時は楽しむという素晴らしい仲間に出会えた研究室だと思っています．

朝倉先生におかれましては，まだまだ精力的にご活躍をされると聞いております．山岳トンネルや土木業界に携わる者として今後ともご指導・ご鞭撻のほどよろしくお願いします．最後になりましたが，朝倉先生のご健康とご活躍を祈念しております．いままでありがとうございました．

（鉄道建設・運輸施設整備支援機構　平成21年卒）

朝倉先生のご退職によせて

保　田　尚　俊

朝倉先生には学生時代の 6 年間と教員になってからの 3 年間，併せて 9 年もの間にわたり，ご指導を頂きました．この間，多数の現場見学や委員会活動に参加させて頂くことで，自身の知見を広めることができました．特に，委員会活動に参加させていただいた際は，場違いなところにいるという不安とそのような機会を与えて頂いているという喜びの両方を感じながら，大変貴重な経験をさせて頂きました．

先生に初めてお会いしたのは 3 回生の岩盤工学の授業でした．その授業で学んだことは，朝倉先生は時間には厳しいが，お孫さんが大好きな優しい先生ということです．その時点では，これほどまでに長い間お世話になるということを想像すらしておりませんでした．先生の人柄の良さは言わずもがなですが，今思い返しますと，この10年間で先生はさらに優しくなられた気がいたします．

これまで，先生とご一緒させていただいた中で，直

接的および間接的に大変多くのことを学ばせて頂きました．その中でも最も重要であると感じたことは，物事を常に大局的に見るということです．このことに関連して，直接的には，事あるごとに自分の将来の姿を10年スパンで考えなさいというご指導を頂きました．元来，私は流れに身を任せて生きていくタイプで，先を見据えて行動するのが不得意です．そのため，そのことを上手く実践していくことは困難ですが，ご指導いただいたことを忘れず，先を見据えながら行動するということを常に心がけていきたいと思っています．また，間接的には，委員会の委員長として，議事を進行される姿から，物事を大局的に見ることの重要性を学ばせて頂きました．会議を上手くまとめることができるのは，常に何が重要であるかを忘れずに意識されているからであると思っています．物事の本質を見抜き，そのことを忘れないように常に意識しながら行動するということを自然にできるような人間になりたいと思っています．

先生がご退官されてもう半年以上経ちますが，元々出張が多く，先生にお会いできない日が多かったためか，はたまた，退官後もよくお会いしているためか，未だにご退官されたという実感がございません．

これまでの約10年間，多大なるご迷惑をお掛けいたしましたが，先生には常に笑顔で支えて頂きました．これからも，ご健康に留意され，ご活躍を続けて頂くとともに，私のボスとして，引き続きご指導頂ければ幸いです．

（計測評価工学分野　助教　平成21年卒）

会　　報

京都大学大学院工学研究科教授　酒井　明先生は定年退職されました.

酒井　明先生のご略歴

酒井明先生は，昭和49年３月東京大学理学部物理学科を卒業後，東京大学大学院理学系研究科物理学専門課程修士課程へ進学，同課程を昭和51年３月修了後，同年４月同専門課程第１種博士課程に進学されました．その後昭和55年６月に同課程を単位取得退学し，昭和56年３月まで日本学術振興会奨励研究員，さらに昭和56年９月まで東京大学理学部物理学科研究生となり，この間，昭和56年７月に東京大学理学博士の学位を授与されました．昭和56年10月に東京大学物性研究所助手に採用され，昭和58年11月から昭和59年９月まで AT&T Bell Laboratories 客員研究員を兼任した後，昭和62年４月に株式会社東芝に入社されました.

平成４年11月京都大学工学部附属メゾ材料研究センター教授に採用され，同大学国際融合創造センター教授，産官学連携センター教授，工学研究科教授を経た後に，平成20年４月からは京都大学大学院工学研究科教授材料工学専攻先端材料物性学講座先端材料物性学分野を担任されました.

この間永年にわたって学生の教育と研究の推進に従事し，多くの人材を養成するとともに，学内では，京都大学発明評価委員，京都大学工学部教育制度委員，平成23年には京都大学工学研究科材料工学専攻長を務められました．また学外においては，東北大学原子分子材料科学高等研究機構連携教授を務めるとともに，日本表面科学会関西支部長，日本金属学会関西支部長，を歴任されました．さらに平成24年11月に開催された第7回表面科学およびナノテクノロジー国際シンポジウム（ISSS-7）においては大会副委員長を務めるなど，学術行政に尽力してこられました.

酒井明先生の御研究は多岐にわたりますが，表面科学およびナノ材料科学の分野で多くの業績を挙げておられます．走査トンネル顕微鏡を用いた研究はもとより，特に金属単原子接点の研究を世界に先駆けて開始され，この分野の初期の発展に多大な貢献をされました．またその後，単原子接点の研究で培われた技術を応用され，単分子架橋構造の物性および安定性に関する研究で分子エレクトロニクスの分野においても多くの貢献をされました．その後興味の対象を単原子・単分子のご研究からナノサイズ接点の変形挙動に移され，特に hcp 金属のナノ接点の変形挙動の解明・理

解に尽力されました．このように酒井明先生は常に独自の技術を用いて先駆的な研究を行ってこられました．その研究に対する姿勢は酒井明先生の御指導を受けた皆に引き継がれていることと思います．これまでの先生のご指導に厚く感謝申し上げると共に，先生のご健勝を心よりお祈りいたします．

黒川　修
（先端材料物性学分野　准教授　平成６年卒）

酒井明先生のご退職に寄せて

長谷川　幸　雄

私が酒井先生に初めてお目にかかったのは，酒井先生が助手をされていた研究室に私が修士学生として配属になった時で，もう30年以上も前のことである．今を思えば，あまりの教養・知識の無さに呆れられたのではないかと推測するが，酒井先生は，我々学生に学ぶべきこと研究する上で必要なことを，「ご存知とは思いますが」と言いながらも，いつも懇切丁寧に解りやすく教えてくださった．また当時の研究室主催の先生が，今であればパワハラ・アカハラで訴えられかねない程の厳しい方であったが，そんなときも常に間に立ち我々のフォローをしてくれたのも酒井先生であった．私などは散々御迷惑をおかけした口であるが，酒井先生はいつもニコニコと優しく，しかし学問・研究に関しては厳しく，御指導いただいたことは誠に感謝に堪えない．

その後，しばらくして酒井先生は企業に移られ，直接指導を受ける機会が無くなったが，折に触れて気にかけていただきいろいろ御教示いただいた．そして，酒井先生が附属メゾ材料研究センターの教授として着任された際に，助手として拾っていただいた．酒井先生が自ら研究室を立ち上げる場に居合わせたことは幸運で，その後自分の研究室を立ち上げた際に大いに役立った．先生には，限られた状況の中，御自身のテーマを据え置いてまでも私の研究を優先していただいたが，先生の懇意に見合う成果を挙げぬままに転出してしまったことが心残りであった（その後，引き継いだ学生達は大いに頑張ってくれたが）．

酒井先生との日々を思い起こしてまず浮かぶのは，楽しそうに学術雑誌を読む先生の姿であろう．酒井先生は，物理分野では最も権威ある雑誌として知られるPhysical Review Letters誌やアメリカ物理学会誌であるPhysics Today誌を購読されており，雑誌が届くとまずは目を通して世界の物理の動向をチェックするのが常であった．始発の空いた通勤電車の中で，そして教授室に着いてからはラジオから流れるクラシック音楽を背景にコーヒーカップを傾けつつ，愛読のPRLを読み耽る．物理を愛する酒井先生にとっての至福の時間であったであろう．

そして，何事にもきっちりと丁寧にされるのが，酒井流である．書類は必ず机に平行におかれ，配管類は全て鉛直か水平でかつ直交．電気回路も配線は直角に曲げられ，しかもケースの枠に沿ってきっちり束ねられているなど，細部にわたって丁寧に組み上げられている．誰もマネできないので，手を付けるとすぐに「触りましたね」とバレてしまう．実は，私の研究室には，酒井先生が30年前に組み上げられた高圧電源があるが，いまだに壊れることなく現役として活躍している．丁寧な作業の真骨頂であろう．ふたを開けて覗いてみると直角配線も健在である．

さらに，酒井先生と言えば，その博学ぶりはつとに有名である．物理・科学全般に限らず，音楽・歴史など何でこんなことまで知っているのかと思うようなことまで知っている．厳しい先生も何か判らないことがあれば「酒井さんに訊いてごらん」が口癖であったし，我々も随分と重宝させていただいた（注：当時googleはまだ無かった）．酒井先生にセミナーや講演などしていただくと，その博学がほとばしる実に解りやすく，かつ示唆に富んだプレゼンをされ，我々も何か解った気にさせられたものである．またあるとき，研究室に外国から分野の著名な先生が数か月滞在されたことがあった．相当のオペラ好きでオペラのことなら何でも知っていることが自慢の先生であったが，酒井先生もオペラに興味があると聞きつけ早速オペラ談義に花を咲かせようとしたところ，当初は饒舌であったものの酒井先生があまりにも良く知っていることに驚き，終いには自信を無くして意気消沈してしまったこともある．

このように稀有な才能をお持ちでありながら偉ぶることはなく，なぜか周りには丁寧で腰が低いのが酒井先生であり，学会・コミュニティでも人望を集めて大いに頼られる存在であった．学生には時に厳しくともいつも愛情深く接しておられたことから，私も含めて皆から慕われてきた．最近では，ともすればこうした雑務に時間を取られ，本当にお好きな学問・音楽等を十分に堪能されることが無かったのではと推察する．今後は，先生ご自身のことに時間を割いていただき，益々ご活躍されることを祈念したい．またいつか，酒井先生のピアノ伴奏での奥様の歌唱など拝聴させていただくことがあればと願いつつ，先生の御退職に寄せた駄文を閉じることとする．

（東京大学物性研究所　平成４年－６年附属
メゾ材料研究センター助手）

酒井明先生の御退職に寄せて

筒　井　真　楠

私は，平成15年から博士課程生として，酒井先生に

ご指導いただきました．バルク熱電材料の研究を進めていく内に，量子物性学に興味を持つようになった当時の私は，単原子ワイヤーにおける室温量子伝導の研究に魅かれ，酒井研究室の門を叩きました．酒井先生にしてみれば，どこの馬の骨ともわからない奴が来た，という印象だったと思いますが，寛容なご指導の下で，１原子や１分子における量子伝導に関する，当時としてはチャレンジングな研究に，３年間邁進させていただきました．

酒井研での研究生活は，酒井先生の深い知識と独特な精密さに圧倒される毎日でした．

博士課程を通して取り組んだ１原子接点の電気輸送特性に関する研究は，新しい装置作りから始まりました．私は機械系出身であり設計にはそれなりに自信があったのですが，ある日，外注用の装置設計図案を持って酒井先生に相談にいったところ，機械的な要素だけでなく，「この形状だと加工が面倒くさい」とか，「ここの部分は銀楼付けにして」など，製作者の立場に立ったご指摘もいただき，その造詣の深さに驚き，感銘を受けました．

また，出来上がった装置の立ち上げの際には，「ピエゾ素子の駆動用に使ってください」とのお言葉とともに，アルミボックスを手渡されました．中には，一本一本の配線まで驚くほどピッシリ整列した，先生自ら組まれたボルテージフォロア回路が入っていました．ちなみに，その芸術品のような綺麗な回路は，私の実験中の不注意でショートさせてしまったのですが，その時はスパークが発生し，壊れ方も見事なものでした…（酒井先生，折角の装置を申し訳ありませんでした）．

こうして，酒井先生から学んだものづくりに対する姿勢は，私の研究生活の基礎として根付いています．このごろは，学生を指導する際に，酒井先生にご指導いただいたことを思い起こすことも多く，改めて先生の偉大さを感じております．学生時代から現在まで，至らぬ私を温かくご指導くださった酒井先生には感謝の念が堪えません．酒井研の一員であったことは，私にとって大きな財産です．わずかでもご恩返しできるよう，これからもしっかりと自らの研究に励んでゆきたいと考えております．

酒井先生，長い研究生活お疲れさまでした．これからのご健勝とご多幸をお祈り申し上げております．

（大阪大学准教授　工博　平成18年卒）

酒井明先生の御退職に寄せて

小　林　賢　吾

私が初めて酒井先生にお目にかかったのは学部２回生の工業数学の授業でした．授業の内容はフーリエ変換やラプラス変換などの数学に関するもので，私にとっては非常に難解だったことを覚えております．しかしながら，酒井先生が配布されたテキストはわかりやすく，数学に対し苦手意識を持っていた私にも良く理解できるようになっており，授業もわかりやすかったです．このおかげで，ある程度フーリエ変換やラプラス変換の基本を身につけることができたのではないかと思います．その後，４回生の際に半導体や走査トンネル顕微鏡（STM）に関する授業を受けました．この授業も非常にわかりやすく，ためになるものでした．中でもバイポーラトランジスタを開発した，バーディーン，ショックレー，ブラッテンの業績と逸話は半導体に対して非常に興味を持つきっかけになったと思います．

４回生の研究室配属では当時の足立研究室を選択し，第一原理計算を用いた研究に携わりました．その中で，PC を使用した計算以外にも実際に手を使った実験もしてみたいという気持ちが芽生えてきました．そこで修士課程では授業の印象が最も強かった酒井先生の研究室への配属を希望し，配属されました．

研究室配属当時までは授業の中での酒井先生しか知りませんでしたが，研究室に入ったことで日常の酒井先生も知ることが可能となりました．酒井研究室では毎週１回，研究室会があり，その中で学生達持ち回りでの論文の読み合わせを行っておりました．取り上げる論文については特に規則がなかったため，学生達は自分が興味を持った論文を取り上げることが多かったと記憶しております．しかしながら多くの場合，論文を取り上げた学生以上に論文の内容を理解し，解説を行っていただいたことは，酒井先生の知識の豊富さにただただ驚かされるだけでした．また，毎年開催される酒井先生宅での新年会では奥様とのピアノの連弾をご披露くださり，先生のご才能が研究だけでなく多岐にわたる分野に発揮されていることがよくわかりました．

最終的に私は修士課程，博士課程と進学し，合計５年間，酒井先生の元で研究を行わせていただきました．博士号の学位もなんとか取得することができました．修士論文，博士論文ともに，最終的な提出の前にご確認いただくのですが，その論文が修正のため真っ赤になって戻ってきたことを良く覚えています．非常にお忙しいにも関わらず，学生に熱心にご指導されていることに頭が上がらない気持ちです．研究室で本当に様々な経験をさせていただきました．このことは私にとって大きな財産となっております．今後も今までと変わらないご活躍をされますことをお祈り申し上げます．

（株式会社日立ハイテクサイエンス　工博　平成15年卒）

平成29年度 水曜会後援ソフトボール大会

●日時　平成29年５月～７月（平日朝）
●会場　京都御苑今出川グラウンド

今年度のソフトボール大会も昨年度に引き続き水曜会から後援して頂けるということで例年よりも盛り上がる大会となりました．また，各研究室のチームだけではなく教員チームや三回生チームが結成されました．大会結果は以下の通りになりました．

Aリーグ	邑瀬研	杉村研	三回生	田中研	ナノ研
邑瀬研		杉⑥-邑３	三⑦-邑２	田⑤-邑３	ナ③-邑１
杉村研	杉⑥-邑３		三⑤-杉１	田④-杉２	引分け6-6
三回生	三⑦-邑２	三⑤-杉１		三⑥-田０	ナ⑧-三４
田中研	田⑤-邑３	田④-杉２	三⑥-田０		ナ⑬-田５
ナノ構造学研(白井研)	ナ③-邑１	引分け6-6	ナ⑧-三４	ナ⑬-田５	

Bリーグ	乾研	宇田研	先端材料物性	石山研
乾研		宇⑦-乾６	先⑱-乾５	石⑳-乾２
宇田研	宇⑦-乾６		先⑰-宇５	石㉗-宇３
先端材料物性学研(酒井研)	先⑱-乾５	先⑰-宇５		石⑭-先13
石山研	石⑳-乾２	石㉗-宇３	石⑭-先13	

Cリーグ	平藤研	松原研	教員T	河合研
平藤研		松⑫-平３	教⑰-平１	河⑨-平８
松原研	松⑫-平３		教㉛-松11	河⑫-松２
教員T	教⑰-平１	河⑨-平８		教⑮-河７
河合研	河⑨-平８	河⑫-松２	教⑮-河７	

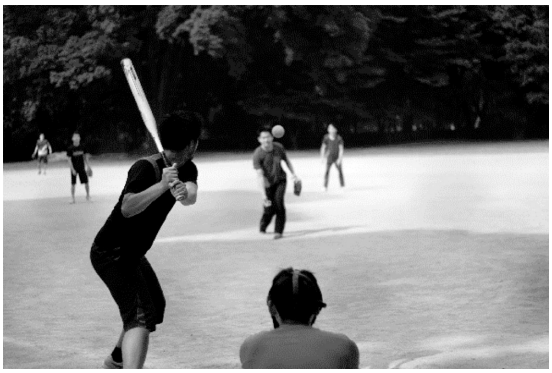
Dリーグ	石原研	辻研	高井研	長谷川･土井研	中村研
石原研		石⑬-辻４	高⑧-石６	長･土⑥-石１	石⑭-中６
辻研	石⑬-辻４		高④-辻１	長･土⑮-辻７	辻⑥-中４
高井研	高⑧-石６	高④-辻１		高⑥-長･土５	高⑲-中２
長谷川・土井研	長･土⑥-石１	長･土⑮-辻７	高⑥-長･土５		中棄権
中村研	石⑭-中６	辻⑥-中４	高⑲-中２	中棄権	

決勝トーナメントの結果，優勝は教員チーム，準優勝石山研，三位ナノ構造学研，四位高井研，となりました．

今年度は参加チームが増えたことと天候不良による試合延期が多かったことにより，例年よりも開催期間が延びてしまいましたが，参加者皆様のご協力により円滑なる試合進行ができましたことを，幹事として心より御礼申し上げます．

秋季にはフットサル大会が開催されるので，また熱い戦いが繰り広げられることを楽しみにしております．

（田口智喜　記）



試合風景

決勝戦後の集合写真

平成28年度 水曜会後援フットサル大会

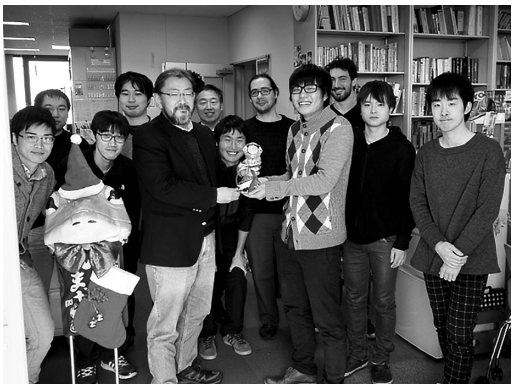
●日時　平成28年10～11月
●会場　京都鴨川西岸グラウンド

今年度のフットサル大会は，前期に行われたソフトボール大会に引き続き，水曜会から後援していただけるということで，大盛り上がりの大会となりました．14チームが参加した今回の大会結果は，以下の通りになりました．

下記の結果より，優勝は田中研，準優勝は平藤研，３位は辻研となりました．

表彰式は，工学部物理系校舎の田中研究室の居室にて行われました．教授から優勝の田中研に優勝カップの授与が行われ，その後，全体で集合写真を撮影しました．

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



優勝した田中研チーム

A組	杉村研	酒井研	長谷川・土井研	田中研	勝敗分(得失点)
杉村研		○3-0	●0-1	●0-5	1-2-0 (-3)
酒井研	●0-3		●0-2	●0-2	0-3-0 (-7)
長谷川・土井研	○1-0	○2-0		△0-0	2-0-1 (+3)
田中研	○5-0	○2-0	△0-0		2-0-1 (+7)

B組	邑瀬研	ナノ・河合研	平藤研	勝敗分(得失点)
邑瀬研		△1-1	●0-5	0-1-1 (-5)
ナノ・河合研	△1-1		●0-9	0-1-1 (-9)
平藤研	○5-0	○9-0		2-0-0 (+14)

C組	辻研	宇田研	塩路・石山研	勝敗分(得失点)
辻研		○3-1	○2-0	2-0-0 (+4)
宇田研	●1-3		△1-1	0-1-1 (-2)
塩路・石山研	●0-2	△1-1		0-1-1 (-2)

D組	乾研	石原研	松原研	中村研	勝敗分(得失点)
乾研		●0-2	●0-2	○4-3	1-2-0 (-3)
石原研	○2-0		○2-0	△0-0	2-0-1 (+4)
松原研	○2-0	●0-2		○4-1	2-1-0 (+3)
中村研	●3-4	△0-0	●1-4		0-2-1 (-4)

準決勝1	田中研(A組1位)1-0辻研(C組1位)
準決勝2	平藤研(B組1位)3-2石原研(D組1位)
決勝	田中研1-0平藤研
3位決定戦	辻研3-2石原研

フットサル大会試合の写真

会 員 消 息

資源工学科卒業30周年記念同窓会

今は地球工学科資源工学コースとなりましたが，その前身である資源工学科を昭和61年３月に卒業してから，平成28年３月で早くも30年が経ちました．卒業以来東京や京都などで少人数での集まりはありましたが，S61卒全体として同窓会を開催していませんでした．そこで，この卒業30周年を記念し，紅葉が盛りに向かう頃の平成28年11月12日(土)に京都大学百周年時計台記念館の２階会議室にて同窓会を開催しました．恩師の先生方に30周年記念の旨をご連絡しましたところ，若松貴英先生，佐々宏一先生，花崎紘一先生，西山孝先生，斎藤敏明先生に快くご参加いただきました．また，折角の機会ということで先輩，後輩方にお声掛けしましたところ，藤村健司さん，伊藤俊秀さん，李仁鉉さん，前川慎喜さん，佐藤秀さん，さらには現コースの教授であります林為人先生にもご参集いただきました．特に李さんはこのためにソウルからのお越しでした．仕事等の関係でS61卒組の参加者は井上，今村，岡本，日下，小池，小鯛，後藤，佐賀野，渡辺の９名止まりでしたが，ご協力の賜で総勢20名の賑やかな会になりました．

多くが卒業以来30年ぶりに互いの参加者や恩師の先生にお会いしたということで，思い出話に花が咲きました．恩師の先生方と参加者それぞれから近況のご報告もいただき，30年での私どもの成長ぶり(？)を先生方に楽しんでいただけたことと思います．若松先生の乾杯のご発声で18時半より始まった会も楽しい雰囲気の中で大いに盛り上がり，予定の時間を大幅に超過してのお開きとなりました．そのままの勢いで二次会も日付が変わるころまで続き，近々の再会を誓って，名残を惜しんでの散会でした．年相応に容姿は変わりましたが，飲むペースと量，何よりも気持ちは学生時分と変わらなかったようです．今回残念ながら参加できなかったS61卒組には，次回会えますことを楽しみにしています．末筆ながら，ご参加いただきました先生方と皆様方に重ねて御礼申し上げます．

（小池克明，渡辺俊樹）

会　員　通　信　欄

平成29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．

柳沢　雅勇(昭和16年12月)　いつも御案内ありがとうございます．高齢のため，外出がままならなくなりました．

村上　陽太郎(冶金，昭17)　元氣に過しています．本年４月７日に満100才になりました．

三宅　敏夫(冶金，昭18)　平凡に毎日恙なく過ごしています．

山本　剛男(冶金，昭20)　まずまずの生活を送っています．

佐伯　博蔵(鉱山，昭21)　年令相応には元気にしていますが，心身共に老化が進んでいます．94才．

末吉　敏彦(鉱山，昭21)　年なり（93才）の生活をしています．

日野谷　一郎(冶金，昭21)　高齢の為，介護付高齢マンションに転居致しました．

寺井　士郎(冶金，昭22)　卒業70年，まずまず元気に過して居ります．皆様方の御活躍を楽しみに．

三谷　文夫(鉱山，昭23)　馬齢を重ねて93歳を越しました．人生のロスタイムを生きています．いろいろのことを考えて，家内と２人で老人ホームに入りました．介護士さんが交替で24時間常在してくれているのは心強いです．憲法を変えて，前途有為な青年を戦争に狩り立てる世の中にならないことを切に願っています．

山本　和男(鉱山，昭23)　地域の年寄り連中とマージャンだ，旅行だ，ゴルフだと，何んだかんだヤットついて行ってますが，いづれも最高齢です（内心迷惑かけてると心が痛むのですが）．

二宮　　脩(鉱山，昭26)　元気に「卒寿」とかを迎えます．面白い文字です．時間があると昨今の技術とか世の仕組みとか思ったりしますが，根源の基礎資源について研究されておられる皆様方のご活躍を切に祈っております．

浅井　浩実(冶金，昭28)　元気にすごしています．諸兄によろしく．

岩田　徳重(冶金，昭28)　出不精になりましたが，無事に過しています．

清滝　昌三郎(鉱山，昭30)　晴耕雨読．唯一の運動のゴルフは続けてますが，スコアはカウントせず．

伊藤　福夫(鉱山，昭30)　秋田市に転居して早３年になりますが，話する相手もなく，毎月１度上京して，コンサートや美術館巡りをして楽しむようにしています．

佐藤　史郎(冶金，昭30)　往時渺茫，平穏な毎日です．

長澤　元夫(冶金，昭31)　体を痛めましたため，数ヶ月のオーダーでやすんでおりました．皆々様の御健勝をお祈りいたしております．

野村　悦二(冶金，昭31)　潜在的な患いを抱えていますが，これらと仲良くし，時には技術誌，業界誌を眺めながら過ごしています．

成松　幸俊(鉱山，昭33)　一応元気に，在京外国人の日本語習得支援などしながら過しています．

田中　孝一(冶金，昭33)　体力，気力，病と次第に進行する老化現象に悩まされることが多くなってきました．しかし，幸にも日常の生活は特に支障なく過せています．

松本　洋祐(冶金，昭33)　ご盛会を祈っております．

平居　正純(冶金，昭35)　何とか元気に暮らしています．

柳沢　恒雄(鉱山，昭35)　1960年鉱山科卒の同期会を５月19日12時より15時迄，新横浜駅傍で開催します．生存者15人中13人出席予定．

高畠　哲雄(鉱山，昭36)　囲碁の仲間と毎回の戦いが脳を使う方法と思って努力してます．Ｓ36卒の最后？の同窓会を秋に京都で計画中．各位最后と思って顔を見せて下さい．

岩崎　　滋(冶金，昭36)　日常業務に忙殺されて，大会出席を致しかねておりますが，至って元気に致しております．

新宮　秀夫(冶金，昭36)　元気！

梅津　善徳(鉱山，昭38)　元気にしております．会員の皆様の御活躍を記念しております．

栗原　宏武(鉱山，昭39)　加齢と共に医者通いが増えてきました．皆様には，大変お世話になりましたが，高齢に付，連絡は今年限りにして頂きたいと思います．ありがとうございました．

横井　健至(冶金，昭40)　特許等の出願状況から，世界の動向を色々と感じています．

横山　羌泰(資源，昭41)　市内の小学生を対象に，今

まで滞在した国々（アジア，アフリカ，中近東等）を題材にして，「世界で暮らす」というお話し会を定期的に開いています．日本とは一味も二味も異なった外国の状況（あるいは外国語）に興味を持ってもらうためです．

東　勝（冶金，昭41）　元気さ年相応，生涯現役．

森　邦彦（冶金，昭41）　変わらず，元気に生活しております．水曜会の同級生とは教養の時のクラス（T2）会として毎年，旅行やゴルフを楽しんでいます．盛会をお祈り致します．

白井　秀明（金属，昭41）　37年入学で41年卒の「ミナ・ヨイ会」は毎年集って皆酔っています．この前は台湾，福島，ことしは広島です．

加藤　雅典（冶金，昭42）　本年10月17日（火）金属系学科（冶金・金属加工）の卒業50周年になりますので，芝蘭会館 国際交流会館で12時～14時に OB 会を開催致します．関東方面からも出席する者が10数名います．

上村　隆夫（金属，昭42）　年相応に元気にすごしています．

福田　隆（金属，昭43）　JIS 規格の制定・改正ならびに高校生への理・数の指導に従事しています．週３度のテニスと旅行で英気を養ってます．水曜会大会に出席できなく，来年こそはと思ってます．

丹羽　正男（資源，昭44）　足腰不良によりリハビリ施設に通う以外，殆んど自宅に篭りっきりの生活を送っています．

金澤　守（冶金，昭44）　全て今は昔となり．

友田　陽（冶金，昭45）　元気に研究に励んでいます．プロジェクトの関係上，月に２回は産総研にも出勤することになりました．

中嶋　一雄（冶金，昭45）　遠方なので欠席させていただきます．

山田　範保（資源，昭46）　札幌での行事があり，又，遠方故欠席です．水曜会のご盛会をお祈り致します．

萱原　徹男（資源，昭46）　ライフワークの熟成には，老い行くことも必要との実感をもって，日々努めています．

野市　晴夫（資源，昭46）　連絡ありがとうございます．所要あり，参加出来ません．盛会を祈ります．教育（今日行く処あり），教養（今日用あり）に励んでいますが，少々疲れてきました．

落合　庄治郎（冶金，昭46）　定年から五年が経ちましたが，何とか元気で過ごしています．水曜会大会当日は，所用のため，申し訳ございませんが，欠席します．

中下　新吉（冶金，昭46）　今年は（数えで）喜寿になってしまいますが，旅行，ゴルフ，習事として野菜と元気です．

水原　誠（冶金，昭47）　昨年６月末に退職し，10年半の単身赴任生活を終了し，大阪に帰っています．ジム通いやゴルフ等で，元気な毎日を送っています．

牟田　潤（資源，昭48）　昨年秋より，三鷹からふじみ野市に勤務先がかわり，久々に東上線で通勤しています．

川村　健一（資源，昭48）　本年も，大学の行事と重なり欠席です．

朝日　格（冶金，昭48）　昨年より，海運会社に勤務しています．新しい世界を楽しんでいます．

福井　康司（金属，昭48）　まだ現役で働いています．海外出張も多く，忙しい毎日を過しています．

朝倉　俊弘（資源，昭49）　３月末をもって京都大学を定年退職いたしました．NPO 法人「トンネル工学研究会」を設立し，今しばらくトンネル工学の発展に寄与したいと思います．

森田　和元（資源，昭49）　仕事内容が大学時のものとまったく異なるため疎遠になっております．自動車分野での人間工学関係の仕事に取り組んで参りましたが，この３月で退職しました．

加藤　健三（金属系，昭49）　退職しました．

楠井　潤（金属系，昭51）　東洋アルミのパウダー・ペースト事業本部で，アルミペースト（顔料）を世界中に売っています．

工藤　壽美生（資源，昭52）　今年３月31日で住友金属鉱山㈱を退職しました．

津﨑　兼彰（資源，昭52）　2013年４月につくば NIMS から九州大学機械工学部門に異動しました．出身高校は福岡の修猷館で，福岡に馴染みはあるのですが，福岡に住むのは高校卒業後40年ぶりでしたので最初は戸惑いました．しかし４年間で博多弁もそれなりに話せるようになりました．九州大学では金属疲労の研究をしており，３月にサイエンス誌に論文が掲載されました．

宮脇　新也（金属系，昭53）　３月末に旧足立研の同窓会があり，なつかしい皆さんと楽しいひとときを過ごすことができました．

竹士　伊知郎（金属系，昭54）　先の見えない時代です．自分が何をできるのか模索の日々です．

山名　壽（金属系，昭54）　富山８年目になります．毎日，新商品開発や大型プロジェクトに忙しくしています．

北村　公亮（資源，昭55）　京都に転居して丸三年が経ちました．定年まであと一年を切り，次のステップを考える毎日です．

須川　壮己（資源，昭55）　元気に毎日片道１時間半以上の通勤をこなしています．腰，眼と少しづつ機能低下してますが，頭はなんとか維持努力しています．IT のご相談，特に大量データはお任せください．

大谷　隆児（金属系，昭55）　京都大学生存圏研究所（宇治キャンパス）に勤務し，マイクロ波電力伝送の共同研究，実用化の支援，推進をしています．

竹川　禎信（金属系，昭55）　今年（2017年）4月でパナソニックを定年退職しました．

道本　龍彦（金属系，昭55）　定年まで残すところ10ケ月となりましたが，相変らず実験等に追いまくられています．

田中　真人（資源，昭56）　本年3月末で勤務先の豊田通商（出向先：豊通ケミプラス）を退職しました．

及川　初彦（金属系，昭56）　新日鐵住金㈱のグループ会社で営業を担当して3年になります．技術の流れは大きく変化し，それについていくため，勉強の毎日です．京都へは行くチャンスが無く，懐かしく思います．

平藤　哲司（金属系，昭56）　多くの方々が大会に参加されますよう願っております．

原田　晋作（資源，昭57）　すみません．都合がつかず欠席させていただきます．

喜多　隆介（金属系，昭57）　最近は研究よりも管理運営が中心の生活となっています．

汲川　雅一（金属系，昭57）　昨年から縁あってノーベル賞を受賞された中村修二教授の創始された米国シリコンバレーに本社のあるSORAA社のビジネス立上げに取り組んでいます．カリフォルニア州立大学サンタバーバラ校で中村教授は青色LEDでは実現できなかったフルスペクトルの可視光を実用化してシリコンバレーの投資家と紫LEDを使った第二世代の白色LED光源を製品化しました．GaN on GaN?　LEDは紫色の光を発生します．この紫色LEDの光で赤，緑と青の三色の蛍光体を励起してフルスペクトル，即ち可視領域の全スペクトルを含んだ白色の光を作り出しています．この演色性（色の再現性）の高い光により，あらゆるものが本来の色彩で，太陽光の下で見たように見ることができます．次世代の照明用のLED光源です．青色も少なく目に優しい光源でもあります．

江澤　弘和（金属系，昭58）　本年4月1日より勤務先が東芝メモリ㈱となりました．

小川　和久（資源，昭59）　現在，鹿児島県庁にて高規格幹線道路の整備促進に係る事業を担当しています．

北河　久和（金属系，昭59）　東京単身生活も11年目です．

木村　得敏（金属系，昭61）　東京での単身生活も3年目にになります．盛会を祈念いたします．

森本　　聡（金属系，昭61）　6月より神戸勤務となり東京での3年間の単身赴任を終える予定です．

山本　尚志（金属系，昭61）　現在，タイに駐在．

村上　裕道（資源，昭62）　他用のため参加がかないませんが，盛会と皆様方のご健勝を祈念しております．

岩佐　康徳（金属系，昭62）　現在，米国アラバマ州在住のため，大会を欠席致します．

鳥居　　健（金属系，昭62）　福井での勤務も13年目になりました．電子部品に含有する環境負荷物質の情報提供（顧客対応）業務を担当しております．

岡部　　徹（金属系，昭63）　相変らずレアメタルの製錬やリサイクルの研究を続けています．

中森　英行（金属系，平1）　今年5月1日で創立90周年を迎えました．このうえは更なる社業発展に邁進してまいります．

西尾　裕司（金属系，平1）　元気に働いています．にしお歯科を開院して11年になりました．

山本　健一（金属系，平1）　トランスミッションのアフターサービスの環境整備をする仕事をしております．日産ディーラーさんを回ることもしばしば．先日は岡崎城を訪れ，歴史にひたりました．

吉村　眞一（金属系，平1）　社会に出て四半世紀を超えましたが，ITの発展はじめ世の中が非連続に変わり，働き方も大きく変わる新たな局面を迎えているようです．生産性や効率性をどう伸ばし，人材育成をどう伸ばすのが難しいテーマに直面しています．

森脇　　將（金属系，平5）　ご連絡ありがとうございます．欠席させていただきます．

西　　孝文（資源，平7）　CMOSイメージセンサーの開発を続けております．

磯部　　誠（資源，平7）　九州と関東の転勤を繰り返し現在3つ目の製鉄所で勤務しています．

武内　　淳（資源，平7）　アメリカ出張が最近増えました．主にテキサス州を訪問し海外で日本の道路技術サービスを提供できるよう努めています．

高浜　義久（金属系，平7）　ニューヨークでの3年強の駐在生活を終了し，2017年2月から新日鐵住金㈱技術開発本部で研究員としての仕事を再開しています．

坂本　宙樹（物理工　材料，平14）　滋賀県野洲市で勤務しております．

佐野　　光（物理工　材料，平16）　2017年1月1日に，職場（国立研究開発法人 産業技術総合研究所）内で茨城県つくば市に異動しました．1年間の事務系業務の経験の後に再び大阪府池田市へと戻る予定でおります．妻と2人の子供と楽しく暮らしております．

嶋本　敬介（地球工　資源，平17）　職場近くに家を買いました．

米村　天志（物理工　材料，平27）　新入社員研修中につき，欠席させていただきます

山岡　幸男（元教官）　21年間の韓国の会社の技術顧問を本年（2017年）1月末で退任しました．「金正恩＋トランプの組合せ前に退任したのは幸運だった」というような話にならない事を願うばかりです．

荘司　吉之助（元教官）　95才になりますが，健康にしています．所要で多忙ですが，来年度大会には出席致したく存じます．

酒井　　明（元教官）　申し訳ありませんが，今回は東京に行く用事があり，欠席させていただきます．

平 成 29 年 3 月 卒 業 者 名 簿

旧 資 源 系

学部卒業者

氏 名	研 究 論 文 題 目	就 職 先
応用地球物理学分野 **(旧 ジオフィジクス分野)**		
岩 田 優 生	地熱井におけるシリカスケール析出現象の物理学的モデル化のための基礎研究	京都大学大学院工学研究科(修士課程進学)
大 谷 颯	強度異方性をもつ媒質に対する水圧破砕と差応力の役割解明の基礎研究	京都大学大学院工学研究科(修士課程進学)
渡 邊 勇 介	地震波干渉法を用いた海底下における異方性パラメータの推定	京都大学大学院工学研究科(修士課程進学)
地殻開発工学分野		
金 子 眞 士	Acoustic Emission の振幅比を用いた相対モーメントマグニチュード推定	京都大学大学院工学研究科(修士課程進学)
岸 本 恭 暢	超臨界 CO_2 による岩盤破砕時の破壊メカニズムの検討	京都大学大学院工学研究科(修士課程進学)
山 本 和 畝	石目の卓越方向が異なる岩石供試体による室内水圧破砕実験	京都大学大学院工学研究科(修士課程進学)
計測評価工学分野		
井 長 悠	非接触超音波検査による吊橋ハンガーロープ端末部の劣化評価	京都大学大学院工学研究科(修士課程進学)
木 村 哲 二	数値解析によるトンネル施工の管理基準値に関する一考察	京都大学大学院工学研究科(修士課程進学)
杉 山 佑 樹	高精度傾斜計による大規模地下空洞周辺岩盤の潮汐変形観測	京都大学大学院工学研究科(修士課程進学)
堀 田 直 豊	鋼板裏面欠陥の渦電流探傷におけるバイアス磁界の効果について	京都大学大学院工学研究科(修士課程進学)
地殻環境工学講座		
岡 嶋 純 也	環境トレーサー分析と物質移行解析から示唆される断層周辺の地下水流動状態	京都大学大学院工学研究科(修士課程進学)
切 山 拓 也	地質情報を考慮した地球統計学による鉱石品位モデリング精度の向上	京都大学大学院工学研究科(修士課程進学)
小 路 久 稔	主成分分析を用いた MT 探査データ逆解析の信頼度推定	京都大学大学院工学研究科(修士課程進学)
堀 太 至	物質移行解析による地下水の環境トレーサー濃度の空間分布推定	京都大学大学院工学研究科(修士課程進学)
環境資源システム工学分野		
栢 本 悠 大	傾斜坑井における DCDA を用いた原位置応力の推定	京都大学大学院工学研究科(修士課程進学)
西 本 尚 矢	石油増進回収法への適用を目的としたセルロースナノファイバーの圧入性改善手法の開発	京都大学大学院工学研究科(修士課程進学)
日 高 悠 貴	アスファルテン析出障害対策を目的とした分子動力学計算	京都大学大学院工学研究科(修士課程進学)
矢 野 将 伍	非弾性ひずみ回復(ASR)法を用いた野島断層近傍における応力測定	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
資源エネルギーシステム学分野		
青　木　勇　太	多孔質フィルターを用いた水中の揮発性有機化合物の揮発	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
榊　原　　迪	ナノポーラス Au-Pt の創製と抗菌特性評価	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
出　口　聡一郎	デンドライト電極によるパルス電界殺菌	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
町　田　佑　季	大腸菌の細胞壁の弾性率に及ぼすナノポーラス金の影響に関する分子動力学シミュレーション	東洋電機製造㈱
山　野　友梨子	めっきを利用したシートプロセスによるステンレス積層材の作製	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
資源エネルギープロセス学分野		
武　下　大　成	O/W エマルションの油分濃度が高温固体－液滴衝突挙動に与える影響	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
永　田　恵　督	高温移動平板に衝突する吹上水噴流の熱伝達特性	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
中　辻　雄　也	金属板のスプリングバック時間依存性に関する実験的研究	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
平　野　夏　帆	二段階負荷を受ける純チタン板の応力挙動	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
八　木　翔　吾	種々のひずみ経路における 5000 系アルミニウム合金板の加工硬化特性	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
ミネラルプロセシング分野		
今　井　優　記	ガスハイドレートにおけるゲスト分子の置換挙動の研究	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
杉　村　　渉	エネルギー作物のメタン発酵に向けた前処理の研究	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
杉　山　博　信	石灰岩を原料とした導電性マイエナイト型化合物の作製	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
塚　越　詩　織	マイクロバブルのゼータ電位とその分布	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)

修士課程修了者

氏 名	研 究 論 文 題 目	就 職 先
応用地球物理学分野 **(旧 ジオフィジクス分野)**		
菊 地 海 斗	地中電磁波探査への位相アレイ型アンテナ実現可能性の基礎研究	日本アイ・ビー・エム㈱
米 木 梨 奈	地震波速度異方性による P-SV 変換波発生の基礎研究	東日本旅客鉄道㈱
地殻開発工学分野		
出 崎 秀 一	黒部地点原位置岩盤における水および CO_2 圧入試験	国際石油開発帝石㈱
西 原 健 吾	室内水圧破砕実験におけるき裂造成メカニズムのモーメントテンソル解析による検討	東海旅客鉄道㈱
山 形 直 毅	南アフリカ金鉱山地表下 1 km の切羽の進行に伴って出現する二次元状 AE 分布に関する研究	国際石油開発帝石㈱
北 代 雅 明	南アフリカ大深度金鉱山で起こる誘発地震とその周囲で発生する微小破壊の関係	㈱石油天然ガス・金属鉱物資源機構
計測評価工学分野		
蔭 山 凌	大深度トンネルの施工に関する基礎研究	大成建設㈱
北 澤 慧 真	コンクリート剥離欠陥の振動特性に基づく健全性評価	阪急電鉄㈱
野 田 洋 平	表面波の反射・透過特性を用いた表面開口き裂の深さの評価	ヤマザキマザック㈱
地殻環境工学講座		
石 須 慶 一	熱水鉱床探査における海底電気探査法の適用性に関する研究	京都大学大学院工学研究科(博士課程進学)
内 倉 里 沙	光学センサを用いた高植被率地域における熱水変質帯の抽出	DOWA ホールディングス㈱
高 橋 貫 太	DEM データを用いた断層対応型リニアメント抽出法と地熱地区への応用	住友商事㈱
馬 場 浩 太	拡張性に優れた貯留層シミュレータの開発と超臨界状態計算への応用	ヴイエムウェア㈱
環境資源システム工学分野		
岡 本 直 樹	Investigation of Slip Flow in Nanopores of Shale by Molecular Dynamics Simulation （分子動力学シミュレーションによるシェールのナノ空隙におけるすべり流に関する研究）	宇部興産㈱
杉 山 俊 平	Development of Digital Oil for Investigation of Crude Oil Properties （原油物性の解明のためのディジタルオイルの構築に関する研究）	国際石油開発帝石㈱
立 山 優	Structure Analysis of Oil/Mineral Interface for Enhanced Oil Recovery （石油増進回収技術への応用を目的とした油/鉱物の 2 相界面における吸着構造解析）	大阪ガス㈱

氏　　名	研　究　論　文　題　目	就　職　先
資源エネルギーシステム学分野		
浅　田　知　輝	マイクロ/ナノポーラス材料を用いた水中の希薄な有機物の除去に関する基礎的研究	トヨタ自動車㈱
小　橋　庸　平	High strengthening by nano-anchor effect in aluminum sheet layers fabricated by copper electroplating （銅めっきによって作製されたアルミニウム積層材のナノアンカー効果による高強度化）	キヤノン㈱
松　嶋　悠　太	Microbubble Flotation of Bacteria （菌のマイクロバブル浮選）	㈱フロムスクラッチ
森　　康　平	消化液活用に係る難分解性有機物に対する熱・アルカリ前処理がメタン発酵に及ぼす影響	三菱日立パワーシステムズ㈱
渡　邉　翔　太	The influence of properties of rock and viscosity of fracturing fluid in hydraulic fracture patterns in shales （水圧破砕により頁岩中に造成される亀裂の伸展パターンに与える岩石物性と破砕流体粘度の影響）	トヨタ自動車㈱
資源エネルギープロセス学分野		
芦　田　昌　祥	Hydrodynamics and heat transfer characteristics of oil-in-water emulsion drops impinging on a hot stainless steel sheet （高温ステンレス鋼板に衝突するO/Wエマルション液滴の変形挙動および熱伝達特性）	川崎重工業㈱
鈴　木　智　貴	Time-dependent springback of various sheet metals （種々の金属板のスプリングバック時間依存性）	三菱重工業㈱
藤　﨑　悠　介	Deformation behavior in two-step loading of a commercially pure titanium sheet （二段階負荷を受ける純チタン板の変形挙動）	トヨタ自動車㈱
三　輪　太　志	Three-dimensional simulation of a water droplet impacting on a hot surface in film boiling region （膜沸騰領域の高温固体面に衝突する液滴の三次元数値解析）	千代田化工建設㈱
森　澤　建　太	Cooling characteristics of moving hot plate by impingement of upward jet （高温移動平板下面へ衝突する吹上噴流の冷却特性）	新日鐵住金㈱
ミネラルプロセシング分野		
木　下　陽　介	マイクロポーラスポリマーを用いた天然ガス資源の回収と分離	JXTGホールディングス㈱
龍　田　星　奈	Mechanism of the antibacterial activity of nanoporous Au （ナノポーラス金の抗菌機構）	㈱神戸製鋼所

博士後期課程修了者

氏　　名	研　究　論　文　題　目	就　　職　　先
地殻開発工学分野		
Ziad Bennour	Effect of Hydraulic Fracturing Fluid Viscosity on Stimulated Reservoir Volume for Shale Gas Recovery	
青　柳　和　平	高レベル放射性廃棄物の地層処分に資するための坑道掘削損傷領域の水理・力学特性の評価に関する研究	国立研究開発法人日本原子力研究開発機構
計測評価工学分野		
坂　本　寛　章	振動法にもとづく鉄道トンネル内コンクリート路盤の健全度評価に関する研究	西日本旅客鉄道㈱

博士学位授与者　課程博士

氏　　名	研　究　論　文　題　目	主　　査	取得年月日	備　　考
地殻開発工学分野				
Ziad Bennour	Effect of Hydraulic Fracturing Fluid Viscosity on Stimulated Reservoir Volume for Shale Gas Recovery	石　田　　毅	平成29年３月23日	
青　柳　和　平	高レベル放射性廃棄物の地層処分に資するための坑道掘削損傷領域の水理・力学特性の評価に関する研究	石　田　　毅	平成29年３月23日	
計測評価工学分野				
坂　本　寛　章	振動法にもとづく鉄道トンネル内コンクリート路盤の健全度評価に関する研究	朝　倉　俊　弘	平成29年３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
計測評価工学分野				
深　沢　成　年	内空変位計測による長大海底トンネルの健全性評価に関する研究	朝　倉　俊　弘	平成29年３月23日	昭和56年 京都大学土木工学科卒業

旧 金 属 系

学部卒業者

氏　　名	研 究 論 文 題 目	就　職　先
材料設計工学分野		
近 藤 大 介	カルコゲナイト系におけるアモルファス化機構解明のための ps 領域データ解析	京都大学大学院工学研究科（修士課程進学）
梅 檀 祐 暉	X 線異常散乱法を用いたランダム系物質の構造解析技術の開発	京都大学大学院工学研究科（修士課程進学）
田 中 章 裕	金属ナノワイヤとセルロースナノファイバーの複合材の合成法の開発とその機能の開拓	東京大学大学院工学系研究科（修士課程進学）
服 部 和 樹	XPS を用いたナノシート・基材界面の分極現象の定量化に向けた研究	京都大学大学院工学研究科（修士課程進学）
藤 本　　誠	放射光回折・分光法によるリチウムイオン蓄電池正極の界面構造解析	京都大学大学院工学研究科（修士課程進学）
表面処理工学分野		
飯 塚 昭 博	$TiCl_4$ の Mg 合金による高速還元の実証と容器・ランス材料の探索	東京大学生産技術研究所
大 坪　　誠	統計的機械学習による第一原理イオン伝導挙動解析の効率化	㈱TBI JAPAN
岡 本 克 文	新しい Ti 製錬に向けた偏析での Bi_9Ti_8 の分離による Bi-Ti 合金の Ti 濃縮	京都大学大学院工学研究科（修士課程進学）
久 野 健 治	燃料電池の共焼結時における電解質への Ni 拡散を抑制する方法の探索	京都大学大学院工学研究科（修士課程進学）
清　　尚 輝	部分置換した $La_2(SO_4)_3$ 及び新規蓄熱材料 $Y_2(SO_4)_3$ の脱水・水和特性の評価	京都大学大学院工学研究科（修士課程進学）
プロセス設計学分野 **（現 物質情報工学分野）**		
奥 村 明 央	自由エネルギーを決める特殊構造の探索	京都大学大学院工学研究科（修士課程進学）
神 代 明 暢	応力発光と焦電効果の相関に関する研究	京都大学大学院エネルギー科学研究科（修士課程進学）
山 内　　聡	掌型偏光吸光光度計の試作	京都大学大学院工学研究科（修士課程進学）
山 崎 慶 太	合金状態図の SEM-EDX による研究	京都大学大学院工学研究科（修士課程進学）
渡 邊　　陸	Lp-norm を用いた合金の基底状態の探索	自営業
ナノ構造学分野		
桑 野 太 郎	金属/ガラス界面における拡散現象	京都大学大学院工学研究科（修士課程進学）
香 西 景 太	新規太陽電池材料 Fe_2GeS_4 バルク結晶作製とその物性評価	京都大学大学院工学研究科（修士課程進学）

氏 名	研 究 論 文 題 目	就 職 先
先端材料物性学分野		
稲 毛 康 介	$Co_3Sn_2S_2$ の磁気構造の STM による観察	京都大学大学院工学研究科（修士課程進学）
田 畠 慎 也	Mg LPSO 相の組成に関する二次元ハードディスクモデルによる考察	京都大学大学院工学研究科（修士課程進学）
津 田 竜 一	Yb 単原子接点のコンダクタンス	千住金属工業㈱
樋 口 甲太郎	Zn ナノワイヤの引張試験の MD シミュレーション	京都大学大学院エネルギー科学研究科（修士課程進学）
量子材料学分野		
鈴 木 綜 真	ニューラルネットワークによる材料物性予測モデルの構築	University College London
西 川 隼 人	効率的物質探索のための組成傾斜薄膜の作製	京都大学大学院エネルギー科学研究科（修士課程進学）
溝 上 慧 祐	第一原理フォノン物性を用いた格子熱伝導度予測モデルの構築	京都大学大学院工学研究科（修士課程進学）
宮 本 貴 博	機械学習法による無機結晶データベースからの新規化合物組成予測	京都大学大学院工学研究科（修士課程進学）
村 田 賢 一	化合物組成予測手法に基づいた新規リチウム複合酸化物の合成	東京大学大学院工学系研究科（修士課程進学）
結晶物性工学分野		
浅 倉 誠 仁	FCC 構造を有する高エントロピー合金の強度と平均原子変位量の相関	京都大学大学院工学研究科（修士課程進学）
上 野 拓 也	FCC 合金における鈴木効果の STEM 直接観察	京都大学大学院人間環境学研究科（修士課程進学）
門 田 信 幸	β-Si_3N_4 単結晶のマイクロピラー圧縮試験	京都大学大学院工学研究科（修士課程進学）
栗 原 将 人	NiAl/（Mo,Cr）2 相単結晶の塑性変形	京都大学大学院工学研究科（修士課程進学）
福 山 貴 義	Ti_5Si_3 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）
構造物性学分野		
岡 田 和 歩	微細粒オーステナイトから生成した 8Ni-0.1C 鋼マルテンサイトの疲労破壊挙動	京都大学大学院工学研究科（修士課程進学）
安 井 詔 子	中炭素マルテンサイト・ベイナイト鋼の脆性破壊におよぼす Bain unit サイズと変形温度の影響	京都大学大学院工学研究科（修士課程進学）
安 井 環	超微細粒組織を有する高 Mn-TWIP 鋼の力学特性の変形温度依存性	京都大学大学院工学研究科（修士課程進学）
薮 田 裕 己	HfNbTaTiZr BCC 高エントロピー合金の変形と再結晶	京都大学大学院人間・環境学研究科（修士課程進学）

氏　　名	研　究　論　文　題　目	就　職　先
先端材料機能学分野		
堤　　麻　央	3軸配向と溶液成長を利用した β-$FeSi_2$ バルク擬単結晶の作製の試み	京都大学大学院工学研究科（修士課程進学）
東　森　　稜	Mg-RE-Zn 合金のアモルファスからの LPSO 構造形成過程の検討	京都大学大学院工学研究科（修士課程進学）
橋　本　隆　弘	Mg-K 吸収端の異常小角散乱実現による Al-Mg 合金相分離組織の解析	京都大学大学院工学研究科（修士課程進学）
松　林　領　汰	Fe-Cr-Ni 系合金の初期凝固部における δ/γ 変態	京都大学大学院工学研究科（修士課程進学）
磁性物理学分野		
池　見　友　介	正方晶逆ペロフスカイト型窒化物 Fe_3GeN_x の合成と磁気特	京都大学大学院エネルギー科学研究科（修士課程進学）
河　村　拓　郎	反転対称心の無いチムニーラダー構造を持つ遍歴電子磁性体 $Cr_{11}Ge_{19}$ の磁性	京都大学大学院工学研究科（修士課程進学）
中　辻　健　太	RKKY 相互作用イジングスピングラスにおけるエイジング現象	京都大学大学院工学研究科（修士課程進学）
廣　木　幹　太	電気伝導特性から見た Co-shandite におけるディラック電子系の可能性	東京大学大学院工学系研究科（修士課程進学）
浅　尾　尭　洋	酸素分圧制御による，Ce 置換 M 型 Sr フェライトの相安定性の研究	ソフトバンクグループ㈱
小　山　高　広	$GaMo_4S_8$ 型化合物の単結晶育成	㈱大阪真空機器製作所
材質制御学分野		
石　塚　隆　高	層状ホウ化物のソフト化学的酸化によるボロンナノシート合成の試み	京都大学大学院工学研究科（修士課程進学）
井　上　　剛	Cu_2O 電析浴における銅(II)−α-ヒドロキシ酸錯体の形成挙動	京都大学大学院工学研究科（修士課程進学）
近　都　康　平	ヒドロニウム溶媒和イオン液体の伝導機構	京都大学大学院工学研究科（修士課程進学）
櫻　井　彬　裕	4種の添加剤の協同作用による金属 Li の平滑電析	京都大学大学院工学研究科（修士課程進学）
前　田　有　輝	格子欠陥を生成させた 3C-SiC 電極の分極挙動	京都大学大学院工学研究科（修士課程進学）
機能構築学分野		
板　倉　和　幸	イオン液体構成分子のシリコン基板への固定化	京都大学大学院工学研究科（修士課程進学）
井　上　嵩　人	重水素ランプによる酸化グラフェンの還元	京都大学大学院エネルギー科学研究科（修士課程進学）
三　谷　恭　平	酸化グラフェンのアルキルアミン修飾	京都大学大学院エネルギー科学研究科（修士課程進学）
村　田　　真	イオン液体溶媒和構造の表面官能基依存性分析	京都大学大学院工学研究科（修士課程進学）

氏 名	研 究 論 文 題 目	就 職 先
エネルギー社会工学分野		
高 木 宣 俊	反応性スパッタリング法による酸化鉄エピタキシャル膜の作製と特性評価	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
濱 田 海 里	Al 添加型 ZnO 透明導電膜の劣化挙動に対する熱処理条件と保護金属膜の影響	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
遠 藤 啓 史	二酸化炭素雰囲気におけるポリエチレンとポリプロピレンのメカニカルミリング	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
澤 嶋 悠 輔	新しい空気浄化用触媒材料の有効成分特定とメカニズム調査	㈱キーエンス
若 園 直 樹	Fe_2O_3/Cu_2O 複合体光触媒の合成と水分解能評価および作用スペクトル解析	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
小 坂 尚 大	水溶液の電気分解を利用した二酸化炭素固定化反応の解析およびファラデー効率	SMBC 日興証券㈱
材料プロセス科学分野		
石 井 俊 匡	銅電解アノードスライムの湿式塩化理処理における HCl 濃度依存性	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
井 上 純 輝	ミスト CVD 法による NiO エピタキシャル薄膜の作製	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
小 山 貴 志	非水溶媒を用いた Al 電析方法の検討	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
春 田 優 貴	EMIC-$NiCl_2$ 浴を用いた六方晶 Ni 電析法の検討	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
平 田 瑞 樹	乾燥空気中での長時間アルミニウム電析におけるジメチルスルホン浴の耐久性の評価	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
股 村 雄 也	電析 Al-W 膜の熱処理による硬さ向上	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
プロセス熱化学分野		
大 嶋 祐 介	不均一系溶融塩を利用した Al 濃度センサーの開発	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
金 光 伸 祐	有害物質フリーの低融点ガラスの探索	三菱商事㈱
木 山 謙	窒化ケイ素の焼結反応におよぼす蒸発性焼結助剤塩化ナトリウムの影響	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
田 内 征太郎	製鋼スラグからのアルカリ溶出挙動とその抑制策	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
橋 本 修 志	溶融 Cu 及び溶融 Cu-Ni 合金への S_2 ガスの溶解反応	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
山 口 滉 太	立方体集合組織 Cu テープを用いた $YBa_2Cu_3O_7$ 超伝導線材開発に向けた Nb ドープ TiO_2 導電性バッファ層の研究	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)

修士課程修了者

氏　　名	研　究　論　文　題　目	就　職　先
材料設計工学分野		
東　友東	$Mg(HMDS)_2$系電解液を用いたマグネシウム蓄電池の電極特性	㈱神戸製鋼所
暮石有佑	Sn 合金化 Ni ナノワイヤ不織布を用いたリチウム蓄電池負極の開発	住友電気工業㈱
下川航平	スピネル型酸化物を用いた中温作動型マグネシウム蓄電池の開発	東北大学大学院
前川修也	X 線自由電子レーザーによる多孔性金属錯体の構造ダイナミクスの解明	㈱神戸製鋼所
表面処理工学分野		
大谷祐基	$BaZr_{0.8}Y_{0.2}O_{3-\delta}$(BZY20) 電解質における遷移金属元素の拡散挙動と電解質性能への影響の評価	本田技研工業㈱
熊本和宏	Bi-Mg 合金をカソードに用いたマグネシウム電解と溶融塩電解における過電圧測定	京都大学大学院工学研究科（博士後期課程進学）
鎮目邦彦	新規化学蓄熱材の開発に向けた希土類化合物の探索と脱水・水和反応挙動の解析	京都大学大学院工学研究科（博士後期課程進学）
楽満啓亮	低コスト水素製造プロセス構築に向けた SO_2 水溶液電解および硫酸精製法の研究	IHI㈱
プロセス設計学分野 **（現 物質情報工学分野）**		
秋庭　州	ポータブル吸光光度計	警察庁
宮園　尚	不規則相の構造に基づく LPSO 構造安定性の考察	㈱UACJ
村田　信	液体の熱力学的平衡状態の構造の理論研究	三菱伸銅㈱
ナノ構造学分野		
井上亮輔	カルコパイライト型リン化物におけるホモ pn 接合形成	日本軽金属㈱
古村尭大	ZrO_2 の伝導体準位の調査と透明導電膜としての検討	京セラ㈱
先端材料物性学分野		
平重憲治	Ag 表面におけるフラーレン重合体形成の可能性	三菱電機㈱
別所祐治	金属単原子接点の破断の温度依存性	三菱重工㈱
山口幸大	3 次元アトムプローブと走査トンネル顕微鏡の併用による複合測定手法の開発	JFE スチール㈱
量子材料学分野		
井上悠太	第一原理計算による HCP 金属の双晶変形モードの解析	㈱日立パワーデバイス
木村知紀	無機化合物結晶構造の機械学習手法による分類	新日鐵住金㈱
村田憲治	第一原理計算による超弾性合金の応力下での動的安定性	大同特殊鋼㈱

氏 名	研 究 論 文 題 目	就 職 先
結晶物性工学分野		
河 村 麻莉乃	FCC 構造を有する Cr-Mn-Fe-Co-Ni 高エントロピー合金単結晶の力学特性	日本航空㈱
東 野 行 広	Ir 多結晶の低延性の要因解明	川崎重工業㈱
VEGA FARJE, Juan Antonio	Formation of $MoSi_2$-Mo_5Si_3 Single-Crystal Eutectic Alloys by Selective Laser Melting	京都大学大学院工学研究科（博士後期課程進学）
丸 山 拓 仁	M_5Si_3 型遷移金属シリサイド単結晶のマイクロピラー圧縮変形	㈱コベルコ科研
桃 野 将 伍	Mg-TM-RE 系 LPSO 化合物の塑性変形	日立金属㈱
構造物性学分野		
北 村 裕 樹	完全再結晶組織を有する高 Mn オーステナイト鋼の変形メカニズムと粒径の関係	スカイライトコンサルティング㈱
佐 治 奈萌子	純チタン圧延再結晶板の力学的異方性におよぼす結晶方位と粒径の影響	関西電力㈱
米 村 天 志	低炭素マルテンサイト鋼の水素脆化破壊挙動におよぼす応力分布およびひずみ分布の影響	新日鐵住金㈱
先端材料機能学分野		
宇 野 木 諒	固液共存体のマクロ力学モデルの構築と偏析形成の機構解明	㈱神戸製鋼所
小 野 恵 三	磁気異方性を利用した β-$FeSi_2$ の 3 軸配向組織形成とバルク化	マツダ㈱
山 下 祥 平	X 線イメージングを利用した Ni 基超合金の液相透過率，密度の測定手法の開発と応用	㈱IHI
林 杉	組織傾斜領域を持つ Al 合金中のナノ組織分布の評価手法の開発	日産自動車㈱
磁性物理学分野		
岡 崎 秀 祐	永久磁石材料 La-Co 置換 M 型 Sr フェライトの異方性向上のための高濃度化の検討	ヤンマーホールディングス㈱
中 岡 佑 生	固体窒素化合物を用いた希土類鉄化合物の窒化	新日鐵住金㈱
山 口 龍 太	磁性材料の微視的評価に向けた広帯域無同調周波数高速可変 NMR スペクトロメータの開発	京都府（高校教員）
北 川 晴 樹	クラスタ化合物 $GaMo_4S_8$ の単結晶育成と磁性	JX 金属㈱
材質制御学分野		
竹 岡 駿	溶媒和ヒドロニウムを用いる新規強酸性イオン液体	トヨタ自動車㈱
陳 天 羽	銅(II)-乳酸水溶液系 Cu_2O 薄膜電析浴中の錯体種	京都大学大学院工学研究科（博士後期課程進学）
万 ノ 友 哉	電流振動波形解析による鉄の隙間腐食モニタリング	三菱マテリアル㈱
八十嶋 珠 仁	ナノポーラス電極を用いた水溶液からの Co-Tb 合金電析の試み	トヨタ自動車㈱

氏　　名	研　究　論　文　題　目	就　職　先
機能構築学分野		
神　澤　大　基	ポリオレフィン樹脂への耐有機溶剤シリカ系被覆	㈱IHI
曽　我　正　寛	酸化グラフェンの VUV アシスト化学ドーピング	パナソニック㈱
田　飼　伸　匡	液体金属中 AFM	㈱カネカ
藤　原　吉　宏	平滑シリコン表面の化学活性化による高分子材料との室温接合	日産自動車㈱
エネルギー社会工学分野		
大　澤　貴　弘	Ag と La を添加した $CaTiO_3$ の光触媒特性	大同特殊鋼㈱
加　藤　智　瑛	$ZnFe_2O_4/BiVO_4$ による光触媒 CO_2 還元	JFE スチール㈱
量子エネルギープロセス分野		
永　峰　　碧	酸化亜鉛及びスズドープ酸化インジウムナノ構造体を用いた有機薄膜太陽電池の光マネジメント	金融庁
村　川　賢太郎	Sb_2Se_3 を用いた無機-有機ハイブリッド太陽電池の作製と評価	京セラ㈱
安　達　友　也	有機－無機ハイブリッド太陽電池用 ZnS-$AgInS_2$ 量子ドットのバンドギャップ制御	日産自動車㈱
池　内　智　史	アントラセン誘導体含有電界紡糸ファイバーの作製とその特異的な蛍光挙動の顕微鏡観察	パナソニックファクトリーソリューションズ㈱
武　内　あづ彩	有機薄膜太陽電池用金属酸化物ナノ構造体の作製と光電変換特性評価	㈱デンソー
竹　本　亮　太	中赤外自由電子レーザーによるペロブスカイト構造半導体における選択的格子振動励起の実証	大阪ガス㈱
永　島　小　雪	アニオン性多糖－カチオン性蛍光色素複合体の光学特性評価	三菱電機㈱
八　木　雄太郎	アニオンキャッピングした ZnS-$AgInS_2$ ナノ粒子を用いた太陽電池の光電変換特性	三菱電機㈱
材料プロセス科学分野		
宇　井　　賢	太陽電池応用に向けた超音波噴霧法による $CH_3NH_3PbI_3$ および各種電荷輸送層の成膜に関する研究	国立研究開発法人科学技術振興機構
河　合　俊　和	ミスト CVD 法を用いた Cu_2O 薄膜の作製	三菱マテリアル㈱
形　部　　聖	Al/Ni-W 電析積層膜の熱処理による Al-Ni-W 合金層の形成およびその耐熱性の評価	三菱重工業㈱
嵜　村　麻　子	Al-W 合金膜の熱処理および電気化学エッチングによるナノポーラスタングステン層の形成	住友電気工業㈱
東　野　昭　太	電析 Al-W 合金膜の高 W 含有率化およびアノード酸化	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）
渡　辺　勇一郎	ミスト CVD 法を用いた Cu_2ZnSnS_4 薄膜の作製	住友電気工業㈱

氏名	研究論文題目	就職先
プロセス熱化学分野		
坂本祐作	製鋼工程における蛍石代替材料としての天然鉱石 Nepheline syenite の熱化学的特性	新日鐵住金㈱
藤原克真	低塩基度脱リンスラグの相平衡関係および脱リン能に及ぼす耐火物成分 MgO の影響	㈱神戸製鋼所
松儀亮太	CaO-SiO_2-P_2O_5-FeO 系脱リンスラグの成分活量測定と平衡リン分配比の検討	住友電気工業㈱
エネルギー応用基礎学分野		
喜多村康平	電磁鋼板を基材とした $YBa_2Cu_3O_7$ 超伝導線材における中間層構造の最適化	日本電産㈱
下田佑太郎	MgB_2 超伝導薄膜の高臨界電流密度化および Cu テープを用いた線材化の検討	東京電力ホールティングス㈱
西岡寛広	双晶組織を含む希土類系高温超伝導物質の磁気異方性の向上及び二軸磁場配向	古河電気工業㈱
森村岳雄	配向 Cu テープを基材とした $YBa_2Cu_3O_7$ 超伝導線材に適する Ti 酸化物系導電性中間層の開発及びその安定化効果	電源開発㈱

博士後期課程修了者

氏名	研究論文題目	就職先
表面処理工学分野		
平岩千尋	中温型燃料電池の実用化に向けた高出力かつ大面積なセルスタックの研究	
足立善信	La-M-O 系（M＝Ni, Co）難焼結性層状ペロブスカイト型酸化物群の緻密化と導電率及び酸素不定比性の評価	
岸本章宏	四塩化チタンのマグネシウム還元の反応メカニズムならびにチタンの新製錬法に関する研究	
プロセス設計学分野 **（現 物質情報工学分野）**		
田中亮平	X 線分光と第一原理計算による合金中微量元素分析の基礎研究	京都大学大学院工学研究科
ナノ構造学分野		
中塚滋	Fabrication of bulk crystal and thin film of II-IV-V_2 type compound semiconductor $ZnSnP_2$ for photovoltaic application （II-IV-V_2 型化合物半導体 $ZnSnP_2$ のバルク結晶および薄膜作製と太陽電池材料への応用）	日本学術振興会特別研究員（京都大学大学院工学研究科）
量子材料学分野		
炭谷晃史	リチウム複合酸化物におけるイオン伝導度の系統的評価	JFE スチール㈱
高橋亮	Construction of interatomic potentials using large sets of DFT calculations and linear regression method	京都大学大学院工学研究科（研究員）
大谷紀子	Theoretical investigations of solid solutions and hydrogenation of Ti-V based compounds	古河電気工業㈱

氏　　名	研　究　論　文　題　目	就　職　先
構造物性学分野		
Li Hongxing	Mechanical Properties of Dual Phase Alloys Composed of Soft and Hard Phases （軟質相と硬質相から成る二相組織合金の力学特性）	国立研究開発法人物質・材料研究機構
坪　井　瑞　記	低炭素鋼におけるマルテンサイトおよびベイナイトの低温脆性と微視組織の関係	マックスプランク鉄鋼研究所（ドイツ）
桃　谷　裕　二	低炭素マルテンサイト鋼の水素脆性破壊挙動におよぼす変形条件の影響	三菱重工業㈱
Mohit Joshi	Fabrication of Fine-Grained Magnesium Alloys and Their Mechanical Properties （微細粒マグネシウム合金の創製とその機械的性質）	日本精工㈱
伊　東　篤　志	中 Mn 鋼におけるフェライト＋マルテンサイト Dual Phase 組織の形成と力学特性	兵庫県立大学
朴　　明　験	Effect of Grain Size on Mechanical Properties of Dual Phase Steel Composed of Ferrite and Martensite （フェライト＋マルテンサイト DP 鋼の変形挙動に及ぼす粒径の影響）	京都大学構造材料元素戦略研究拠点ユニット
先端材料機能学分野		
西　村　友　宏	時間分解 X 線イメージングを用いた Fe-C 系および Fe-Cr-Ni 系合金におけるマッシブ的変態の解明	㈱神戸製鋼所
磁性物理学分野		
Mohamed Abdelkareem Ali Ahmed Kassem	Novel magnetic and electronic properties of kagome-lattice cobalt shandites	アシュート大学（エジプト）講師
材質制御学分野		
小　山　　輝	Acceleration of Electrochemical Reactions in Confined Nanospaces Caused by Surface-Induced Phase Transition （表面誘起相転移の発現に基づく拘束空間での電気化学反応の高速化）	北海道大学博士研究員
エネルギー社会工学分野		
Jungryang Kim	Synthesis, thermal stability and electrochemical behavior of lithium boron nitride intercalation compounds （リチウム窒化ホウ素層間化合物の合成と熱安定性および電気化学的挙動）	京都大学化学研究所
量子エネルギープロセス分野		
戸　畑　温　子	（単位認定退学）	サンスター㈱

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
表面処理工学分野				
平岩千尋	中温型燃料電池の実用化に向けた高出力かつ大面積なセルスタックの研究	宇田哲也	平成28年9月23日	
足立善信	La-M-O 系（M＝Ni, Co）難焼結性層状ペロブスカイト型酸化物群の緻密化と導電率及び酸素不定比性の評価	宇田哲也	平成29年3月23日	
岸本章宏	四塩化チタンのマグネシウム還元の反応メカニズムならびにチタンの新製錬法に関する研究	宇田哲也	平成29年3月23日	
プロセス設計学分野（現 物質情報工学分野）				
田中亮平	X 線分光と第一原理計算による合金中微量元素分析の基礎研究	河合　潤	平成29年3月23日	
ナノ構造学分野				
中塚　滋	Fabrication of bulk crystal and thin film of II-IV-V_2 type compound semiconductor Zn-SnP_2 for photovoltaic application （II-IV-V_2 型化合物半導体 $ZnSnP_2$ のバルク結晶および薄膜作製と太陽電池材料への応用）	安田秀幸	平成29年3月23日	
量子材料学分野				
炭谷晃史	リチウム複合酸化物におけるイオン伝導度の系統的評価	田中　功	平成29年3月23日	
高橋　亮	Construction of interatomic potentials using large sets of DFT calculations and linear regression method	田中　功	平成29年3月23日	
大谷紀子	Theoretical investigations of solid solutions and hydrogenation of Ti-V based compounds	田中　功	平成29年3月23日	
構造物性学分野				
Li Hongxing	Mechanical Properties of Dual Phase Alloys Composed of Soft and Hard Phases （軟質相と硬質相から成る二相組織合金の力学特性）	辻　伸泰	平成28年5月23日	
坪井瑞記	低炭素鋼におけるマルテンサイトおよびベイナイトの低温脆性と微視組織の関係	辻　伸泰	平成29年3月23日	
桃谷裕二	低炭素マルテンサイト鋼の水素脆性破壊挙動におよぼす変形条件の影響	辻　伸泰	平成29年3月23日	
Mohit Joshi	Fabrication of Fine-Grained Magnesium Alloys and Their Mechanical Properties （微細粒マグネシウム合金の創製とその機械的性質）	辻　伸泰	平成29年3月23日	
伊東篤志	中 Mn 鋼におけるフェライト＋マルテンサイト Dual Phase 組織の形成と力学特性	辻　伸泰	平成29年3月23日	
朴　明験	Effect of Grain Size on Mechanical Properties of Dual Phase Steel Composed of Ferrite and Martensite （フェライト＋マルテンサイト DP 鋼の変形挙動に及ぼす粒径の影響）	辻　伸泰	平成29年3月23日	

氏　名	研究論文題目	主　査	取得年月日	備　考
先端材料機能学分野				
西村友宏	時間分解X線イメージングを用いたFe-C系およびFe-Cr-Ni系合金におけるマッシブ的変態の解明	安田秀幸	平成28年3月23日	
磁性物理学分野				
Mohamed Abdelkareem Ali Ahmed Kassem	Novel magnetic and electronic properties of kagome-lattice cobalt shandites	中村裕之	平成29年1月23日	
材質制御学分野				
小山　輝	Acceleration of Electrochemical Reactions in Confined Nanospaces Caused by Surface-Induced Phase Transition（表面誘起相転移の発現に基づく拘束空間での電気化学反応の高速化）	邑瀬邦明	平成29年3月23日	
エネルギー社会工学分野				
Jungryang Kim	Synthesis, thermal stability and electrochemical behavior of lithium boron nitride intercalation compounds（リチウム窒化ホウ素層間化合物の合成と熱安定性および電気化学的挙動）	石原慶一	平成29年3月23日	

会 則

改訂（2013年６月15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.

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に必要な事業を行う.

【経 費】

第12条 本会の経費は別途に定める会費，寄付金その他の収入により支弁する.

【会則変更】

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

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

【付　則】

1．この会則は平成25年６月15日から施行する．

2．従前の会則による既会員は従前の会則に基づく会員資格を有するものとする．

水曜会講座等一覧（その１：旧学科，旧専攻等）　　2001年現在

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

水曜会講座等一覧　　2017年現在

学　部	工　学　部	地球工学科	資源工学コース	全講座・分野	資源系
		物理工学科	材料科学コース	全講座・分野	金属系
			エネルギー応用工学コース	エネルギー社会工学分野	
				材料プロセス科学分野	
				プロセス熱化学分野	
				エネルギー応用基礎学分野	
大学院	工学研究科	社会基盤工学専攻		応用地球物理学分野	資源系
				地殻開発工学分野	
				計測評価工学分野	
		都市社会工学専攻		地殻環境工学分野	
				地球資源システム分野	
		材 料 工 学 専 攻		全講座・分野	金属系
	エネルギー科学研究科	エネルギー社会・環境科学専攻		エネルギー社会工学分野	
		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	資源系
				資源エネルギープロセス学分野	
				ミネラルプロセシング分野	
				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　室	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) 原稿は水曜会誌編集委員会が受理した日をもって受理日とする．

(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るため，何卒ご協力の程お願いいたします．

水曜会年次幹事に関する付則

（目　　的）

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

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

（定　　員）

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

（任　　期）

第３条　任期は２年とし，重任は妨げないものとする．

（委　　嘱）

第４条　年次幹事の選任は，同年次会員の推薦により会長が委嘱するものとする．

この付則は平成15年６月14日より施行する．

逝　去　会　員

水曜会誌24巻９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28年８月15日	村本　正佐	昭和20・冶金
平成28年10月30日	梅原　瑞弘	昭和40・冶金
平成28年６月25日	大迫　省治	昭和37・鉱山
平成29年１月３日	木山　英郎	昭和38・鉱山
平成29年３月13日	大川　宗勝	昭和21・鉱山
平成26年12月10日	大西　慶助	昭和21・鉱山
平成28年７月19日	河井　　稔	昭和21・冶金
平成28年６月	横田　徹郎	昭和29・冶金
平成28年春	後藤　　優	昭和31・鉱山
平成28年９月	中原　克幸	昭和23・冶金
平成28年７月	坂本　弘道	昭和28・鉱山
平成28年８月	荻野　俊一	昭和31・鉱山
平成29年３月23日	川口　宜人	昭和33・冶金
平成28年11月23日	藤瀬　　敬	昭和22・鉱山
平成29年３月12日	山肩　和夫	昭和23・鉱山
平成28年12月	藪内　克己	昭和25・鉱山
平成28年７月20日	田中　誠一	昭和26・冶金
平成28年10月	和邇　　博	昭和22・鉱山
平成28年	大西　　格	昭和27・鉱山
平成28年	鈴木　一馬	昭和50・資源
平成29年１月９日	田野　武雄	昭和19・冶金
平成29年１月22日	村田　弘平	昭和24・冶金
平成28年12月13日	石原　和雄	昭和36・冶金
平成28年11月17日	西岡武三郎	昭和25・冶金
平成28年９月27日	小原　元昭	昭和26・鉱山
平成27年10月28日	森　　甲一	昭和32・冶金
平成28年３月	猪又　克郎	昭和30・冶金
平成29年３月	西田　米治	昭和35・鉱山
平成28年６月21日	尾野　　均	昭和34・冶金
平成29年６月４日	中尾　禎造	昭和52・金属
平成29年１月６日	萩森　健治	昭和44・資源
平成29年６月11日	竹内　一郎	昭和21・鉱山
平成28年５月	生長　克己	昭和23・冶金
平成29年	山本　隆造	昭和36・冶金
平成29年６月27日	港　　種雄	特名・元教官
平成28年３月24日	柳生　和威	昭和43・資源

教　室　報　告

教員人事

＜旧資源系＞

平成29年３月31日	朝倉　俊弘	教授　定年退職

＜旧金属系＞

平成29年３月31日	酒井　　明	教授　定年退職
平成28年６月１日	杉田　一樹	助教　大阪大学工学研究科マテリアル生産科学専攻（助教）へ転出
平成28年10月17日	市坪　　哲	准教授　東北大学金属材料研究所（教授）へ転出
平成29年４月１日	谷ノ内勇樹	特定准教授に採用
平成29年４月１日	田中　亮平	助教に採用
平成29年４月１日	池田　裕治	特定助教に採用
平成29年６月１日	岡本　範彦	助教　東北大学金属材料研究所（准教授）へ転出

水曜会誌の企画と投稿のお願い

水曜会誌編集委員会

本委員会では，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，投稿を募っております．『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，投稿規定の分類では『各種記事』に相当します．

具体的には，

○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
○新教官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

などを企画しております．掲載分には薄謝を進呈いたします．奮ってご投稿下さい．また，他に取り上げるべき企画などご意見がありましたら編集委員会までお知らせ下さい．さらに，投稿規定に従い，論文・講座・総説などにつきましても投稿を随時受け付けております．

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，間に合われ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．

本年度から，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投稿の新規開始などを行う予定にしております．今後ともどうぞ宜しくお願い申し上げます．

平 成 29 年 度 水 曜 会 誌 編 集 委 員

委員長　安田秀幸
幹　事　一井　崇（会誌）　村田澄彦（広告）
委　員　中村裕之　柴田暁伸　三ケ田　均
学外委員　瀬村康一郎　安藤哲也　伊藤和博
伊藤俊秀　川林徹也

平成29年10月25日　印刷　平成29年10月31日　発行
編集兼発行者　河合　潤
印刷者　小林誠造
日本印刷出版株式会社
553-0006　大阪市福島区吉野１丁目２番７号
電　話　大阪（6441）6594（代）
FAX　大阪（6443）5815
発行所　京都大学工学部　水曜会
606-8501　京都市左京区吉田本町
京都大学工学部物理系校舎内
電話（075）753-5930（火･金曜日）
振替口座　京都 01090-8-26568 水曜会
銀行口座　みずほ銀行出町支店　普通 1242526　水曜会

October 2017

CODEN : SUIYAA
Vol. XXIV, No. 10

Suiyōkwai-Shi

TRANSACTIONS OF THE MINING AND METALLURGICAL
ASSOCIATION
KYOTO

CONTENTS

Retirement Memorial Lectures

My Forty One Year's Study ····· Toshihiro ASAKURA ···· 1127

Impossible Dreams ····· Akira SAKAI ···· 1138

Memorial Lecture in the Annual Meeting of Suiyokwai

Mineral Resources Business Strategy of Mitsubishi Materials Corporation ····· Naoki ONO ···· 1143

Advanced Technology of Iron and Steel Production to Construct Environmentally Harmonized Society: Role of Visualization in Promoting Innovation ····· Yoshiyuki UESHIMA ···· 1160

Change in a Circumstance Surrounding Automotive Steel Sheets and Related Research Issues ····· Yasunobu NAGATAKI ···· 1173

Forum

Activity in Tottori University from April 2014 to March 2016 ····· Yoshitaka NARA ···· 1177

Influential Factors on the X-ray Fluorescence Intensity: For Trace Elemental Analysis with High Quantitative Accuracy ····· Ryohei TANAKA ···· 1182

Current Studies in Laboratories ····· 1188

Suiyokwai Information ····· 1213

Letter to Editor ····· 1230

Regulations ····· 1246

Kyoto University

Japan