

解体を省力化した電動車モーターからのレアアースの分離・回収 ～ビーカースケールから大型実証炉へ～

早稲田大学 創造理工学部 環境資源工学科 教授 山口勉功

レアアース（希土類）は、周期律表の第三族に属するスカンジウムとイットリウム の2元素に、ランタノイド15元素を加えた計17元素の総称である。レアアース鉱床は世界各地に分布しており、特定地域に偏在しているわけではなく、世界中で採掘が行われている。しかし、ジスプロシウム、Dyやテルビウム、Tbなど中・重希土類の含有量が高いイオン吸着型鉱床は中国に限られている。また、レアアースの製錬は中国への依存度が高く、2024年の世界の製錬量のうち 91.4% が中国で行われている。

レアアースはその化学的・物理的特性から、セラミックス、触媒、高性能永久磁石、蛍光体、高屈折率ガラス、固体電解質、磁歪材料、磁気冷凍など、幅広い用途で不可欠な材料である。特にカーボンニュートラル社会への移行が求められる中、自動車の電動化や風力発電の普及が加速しており、高効率モーターや発電機に使用されるネオジム磁石（ネオジム、Nd、プラセオジム、Pr、Dy、Tb）の需要は堅調に増加している。

近年、レアアースを取り巻く環境は大きく変化している。中国政府は2023年から2025年にかけて、レアアースを単なる商品ではなく「軍民融合の戦略的資産」と位置づけ、採掘から製錬、流通、輸出に至る全工程を国家の厳格な管理下に置く法制度を整備した。2025年にはDyやTbを含む重希土類、サマリウムコバルト（Sm-Co）磁石、関連製錬技術の輸出規制を相次いで導入している。このような官民一体の統制強化により、中国から世界へのネオジム磁石の輸出量は大幅に減少し、2025年4月の輸出量は前年同期比で約55%にまで落ち込んでいる。

本研究室では自動車メーカーと連携し、電動車の駆動用・発電用モーターに使用されるネオジム磁石からレアアースを分離・回収する技術開発を進めている。現在、製造工程で発生する不良品モーターはハウジング、ステーター、ローターに分解され、ステーターから鉄スクラップと銅線が回収される。ネオジム磁石が使用されるローターは強い磁力を持つため、300℃以上に加熱して熱消

磁を行った後に磁石を回収する。しかし、これらの解体作業は一部で機械化が試みられているものの、基本的には人手に依存しており、作業効率が低く、大量処理が難しいのが現状である。

そこで本研究室では、熱消磁やローターの解体を不要とし、大量処理が可能な $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ 系フラックスを用いたレアアース回収技術を開発した。開発したプロセスでは、電動車用モーターをローター・

ステーター・ハウジングに分解し、回収したローターをそのまま高温で処理することで、磁石中のレアアースを $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ フラックスにより溶融酸化物（スラグ）として回収するものである。本研究は、白金ルツボを用いた1g規模の Nd_2O_3 - $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ 系状態図の決定から始まり、各務記念材料技術研究所の100kg溶解可能な高周波溶解炉を用いて実際の電動車ローター1台で検証を行った。現在は、2030年の社会実装を目標に、数トン規模の溶解炉を用いた実証試験を進めている。

本技術により、ネオジム磁石の安定供給と持続可能な社会の実現に貢献することを目指し、研究室の学生と教員が一丸となって電動車モーターからのレアアースリサイクルプロセスの開発に取り組んでいる。

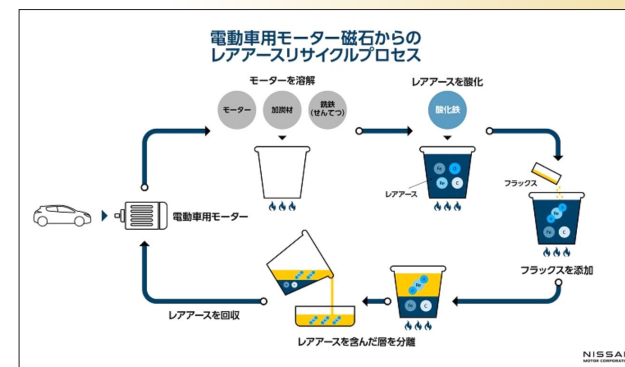


図 作成：日産自動車株式会社
<https://www.waseda.jp/top/news/74644>



山口勉功研究室のメンバー

鑄造研究は早稲田の老舗稼業 設計、生産技術、材料の壁を取り払うものづくりを目指す

鑄造をテーマに自動車部品や建設機械の創製・設計・加工などを追究する吉田研究室。
企業と密接に協働し、実験とシミュレーションの両方を活用する研究室の特徴を聞いた。

早稲田大学 理工学術院教授

吉田 誠

Makoto Yoshida

サイエンスとはいえ、ものづくりに向かうものでなければならぬ

—— 吉田研究室の研究内容として、「近代社会の基盤を構成する機械システムである、自動車・建設機械・鉄道車両の輸送機器、電力システム・各種プラントなどの高性能かつ高機能な材料の創製・設計・加工法に関する研究や材料特性の評価」とあります。テーマが広範囲に及んでいるのでしょうか。

いろいろとやっているように見えて、実は8～9割が鑄造、つまり“溶かして固める”ときにどんなことが起こるかという研究に集約されます。鑄造以外のテーマに、SiCパワーモジュール技術開発がありますが、ここではモジュール内での接合材料、すなわち従来のハンダ代わりとなるAgやCuのナノ粒子焼結体の接合強度や再融解温度などを研究しており、はんだも“溶かして固める”意味では鑄造と同じといえます。

金属は溶かして固めると、孔が空く、割れる、変形する、といったいろいろな欠陥を生じます。欠陥の原因の多くは製造方法によりますが、鑄型への流し込み方や固め方の違いも影響しますし、材質によっても変わってきます。このような欠陥を生じない鑄造法を考案するために、これまでは時間とコストをかけて鑄型の試作を何度も繰り返す必要がありましたが、近年ではFEMを用いた鑄造シミュレーションによって熱解析、応力解析、流動凝固解析などを行うようになりました。

生産技術に関わる自然現象には熱伝導、流体の移動、液体から固体への相変化、熱応力の発生、弾性変形、塑性変形、粘性変形など様々にあり、さらに、製造プロセスにおいてこれらの現象が同時発生するケースも多いのです。コンピュータシミュレーションを駆使しても実際の現象を再現するのは難しく、現実との大きな差異が生じてしまいます。そこで、実験によって実際の物理現象を把握し、その差がモデリングのどの部分で生じているかを検証していきます。

—— 企業と連携するスタイルが多いのも吉田研究室の特徴といえます。



サイエンスとはいえ、ものづくり

に向かうものでなければならぬと考えます。企業と連携する中で、メーカーに出向いて研究することもあります。例えば自動車メーカーですと、EV化が進む中で自動車部品には軽量、強度、剛性が求められ、そのため、非熱処理Al-Si系合金や、非共晶系高延性アルミニウム合金（Al-Mg系など）の使用が増えていくものと予想されています。しかし、湯流れ性や凝固割れを引き起こすなど鑄造性が悪く、どのようにして実用化するかが鑄造研究で注目される一つ分野になっています。加えて、当研究室ではメーカーに対し“次の次”くらいに当たる5年先10年先の自動車部品にはどんなものが良いか、学術・基礎原理に立脚した提案をしています。

「学理を学理として研究すると共に 之を実際に応用する」

—— 吉田先生の研究教育方針に「機械工学出身の設計者は材料と加工法に必ずしも興味がなく～材料工学出身者は材料の使われ方、機械設計に疎い傾向がある～当研究室では設計と材料・加工に最初から壁がない学生を輩出することを一つの目標としている」とあります。

大学の工学系には材料工学と機械工学という大きい分野があって、それぞれは学べても両方を学ぶことは難しいのです。我々のスタンスは機械工学ですが、材料工学がカバーする範囲、例えば合金組成がどうあるべきとか、鑄造、鍛造、切削、あるいは機械部品にどう落とし込んでいくかに積極的に取り組んでいます。

一方、メーカーでは機械工学＝設計と材料工学＝材料の間に生産技術というセクションがあって、これが一番大きいセクションだったりします。一方で、これら全てに精通している人はなかなかいません。そのため、手戻りが大きくなったり、お互いにクレームを言い合ったりすることになってしまいます。しかし、敷居がなくなると効率がよくなります。大学で生

■profile■

1991年早稲田大学理工学部材料工学科卒業、1993年早稲田大学大学院理工学研究科修士課程修了、1996年同上 博士課程修了（工学）、1996年文部教官助手広島大学工学部第一類（機械系）、2003年早稲田大学理工学部准教授、2005年各務記念材料技術研究所兼任、2007年早稲田大学理工学部教授

産技術という何やら学問的な色が薄くなって聞こえが悪くなるためにあまり教えてこなかったかもしれませんが、私は設計、生産技術、材料の壁を取り払える人材を育てたいと思っています。

——先生ご自身は材料工学出身です。どのようにして機械工学に関わっていったのでしょうか。

早稲田では鑄造の研究室にいました。しかし、博士課程修了後、文部教官助手として勤務した先が広島大学工学部第一類という機械系の学部でした。広島なので自動車関係のOEMやサプライヤーが多く、鑄造のニーズもあって、私も鑄造に関わりながら設計や生産技術について関係者にいろいろと教えていただきました。

広島大に7年半いた後、2003年に早稲田理工学部の准教授になり、その2年後に各務記念材料技術研究所を兼任することになりました。私で4代目（自称）です。各務記念材料技術研究所の前身は鑄物研究所であり、1938年、私立大学では初めての鑄造技術に関する研究所として設立され、1988年に現名称に改称されました。設立当時は太平洋戦争直前ということもあって、海軍系の研究所として、全世界における最重要部品であった航空機のエンジンや大砲をつくる研究をしていました。鑄造はまさに当時のハイテク技術だったというわけです。また、早稲田は自動車の研究も古くから盛んで、特にエンジンの研究は日本で最古の類ではないでしょうか。その意味で、私の研究は老舗稼業を継承しているようなものです。

——社会実装に直接結びつく吉田研究室のスタイルは珍しいのではないのでしょうか。

いいえ、大隈重信も実学の学校を目指していたはずで。最初の校名は東京専門学校でしたし。1913年の創立30周年記念祝典で大隈総長が述べた早稲田大学教旨には「学理を学理として研究すると共に之を實際に応用するの道を講し以て時世の進運の資せん事を期す」とあります。

精神論や抽象表現を避けて、詰将棋のように研究を進める

——研究室の概要はどのようでしょうか。

学部生からM2まで各学年ごと10名前後です。博士課程の学生もいます。企業との協働が多いですから会社組織にたとえると、博士課程は部長、M2は課長でM1は係長、学部生はヒラで、私はメーカーに対して仕事を取りに行く営業職でしょうか。対企業では契約とか研究費も関係してくるので私が動かなければなりません。とはいえ、ほかの研究室と比べて“残業”は少ないですし“出勤時間”もうるさくありません。開発職なのでフレックスは当たり前と言えるでしょう。私も学生にはあまり深く関わらないほうかもしれませんが。学生には詰将棋のように考えて研究を進めなさい、と言っているのが月に1-2回指導するくらいです。

修士論文も特別厳しいわけではありません。修士論文は、その時点までの成果をまとめたものにすぎません。それよりも学術論文として掲載につなげるほうが重要です。

——早稲田の学生の特徴はいかがでしょうか。

広島大での経験しかありませんが、国立大は学生の標準偏差が小さく、逆に、早稲田は善くも悪くもバラつきが大きいという印象です。もっとも、最近の早稲田には関東圏の出身者が多いようです。生活費や授業料がじわじわ上がっているのに対し、家庭の収入が厳しくなっていることに関係しているかもしれません。

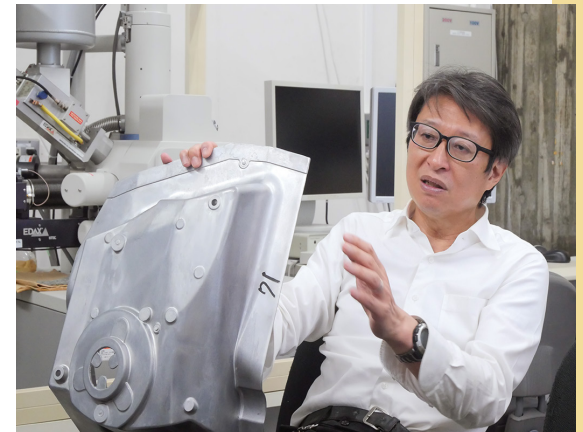
——学生たちによく言う言葉はありますか。

私の机のホワイトボードに掲げています。「堪忍は無事長久の基」「大義をもって仕事をする」「社会の役に立つテーマを見つけられるようになる」「一隅を照らす者は君子なり」「具体的な作戦をもって事にあたること」「精神論は口に出さない」「抽象表現は避ける」「頑張ります、忙しい、は封印」。

最初の「堪忍は～」は徳川家康の遺訓で、怒ると何もいいことはないという意味です。「大義を～」は理由もなく仕事をするのではなく人の幸せのためにする。「具体的な作戦～」は前述したとおり、詰将棋のように手順をもって進めなさい、ということ。もし、理詰めで進めて失敗したのなら、それは失敗ではないので以後、活かすようにと言っています。金と時間をかけているので、失敗を何もなかったことにしてもらっては困ります。ゆえに失敗という言葉は禁句にしています。最後の「頑張ります～」については、「頑張ります」自体には何の意味もなく、もし使うのなら“何を”頑張るのか明らかにしなさい、という意味です。

——吉田先生ご自身で今後やりたいことなどはありますか。

近年では、アルミニウム合金を使用して大型部品を一体成形し車体構造を大幅に簡素化する「ギガキャスト」という鑄造法が話題になっています。米テスラ社が先駆けて採用し中国も追随していますが、日本ではかなり遅れており、国家プロジェクトとして進めているところです。私自身、学会やシンポジウムで基調講演を行うとともに、長年、鑄造と自動車に関わってきた研究者としてしっかりと取り組んでいきたいと考えています。



【研究員】

日本機械学会 v_BASE 研究会 2025 v_BASE フォーラム ベストオーディエンス賞 宮川 和芳（機械科学・航空宇宙学科・教授／各務記念材料技術研究所・兼任研究員）
新エネルギー財団 新エネ大賞（経済産業大臣賞） 宮川 和芳（機械科学・航空宇宙学科・教授／各務記念材料技術研究所・兼任研究員）
一般社団法人 資源・素材学会 資源・素材学会 第 51 回論文賞 所 千晴（地球・環境資源理工学専攻・教授／各務記念材料技術研究所・兼任研究員）
公益社団法人 化学工学会 化学工学会研究賞（賈古雅郎記念賞） 所 千晴（地球・環境資源理工学専攻・教授／各務記念材料技術研究所・兼任研究員）
World Academy of Ceramics 21th Election 2025 in Academician 所 千晴（地球・環境資源理工学専攻・教授／各務記念材料技術研究所・兼任研究員）

【学生】

日本機械学会 関東支部 第 64 回学生員卒業研究発表講演会 Best Presentation Award（学生優秀発表賞） 平沼 拓也（鈴木研究室・M1）
第 20 回 日韓触媒シンポジウム（The 20th Japan-Korea Symposium on Catalysis）Young Presentation Award 渡辺 光亮（関根研究室・D3）
第 20 回 日韓触媒シンポジウム（The 20th Japan-Korea Symposium on Catalysis）Young Presentation Award 増田 拓海（関根研究室・D1）
第 20 回 日韓触媒シンポジウム（The 20th Japan-Korea Symposium on Catalysis）Young Presentation Award 千島 健伸（関根研究室・LD4）
日本鑄造工学会 第 185 回全国講演大会 学生優秀講演賞 土田 菜摘（鈴木研究室・D3）
腐食防食学会 材料と環境 2025 若手講演奨励賞 新宮 やよい（山本研究室・M2）
The 17th International Conference on the Physics of Non-Crystalline Solids (PNCS17) MDI Young Scientist Award Gold Prize 査 思源（平田研究室・D2）
日本マイクログラビティ応用学会 2025 年度 若手奨励賞 門井 洸衛（鈴木研究室・D1）
第 45 回触媒学会夏の研修会優秀ポスター発表賞 秋山 広夢（関根研究室・D1）
2025 電気化学秋季大会 優秀学生講演賞 小宮 歩睦（本間・福永・國本研究室・LD4）
資源・素材学会関東支部「資源・素材・環境」技術と研究の交流会 優秀ポスター賞 渡邊 伊織（山口研究室・M2）
第 15 回次世代天然ガス研究会 優秀学生発表賞 林 美桜（関根研究室・LD2）
日本ゾル-ゲル学会第 23 回討論会 ベストポスター賞 伊藤 萌々花（下嶋研究室・M2）
日本ゾル-ゲル学会第 23 回討論会 ベストポスター賞 沖田 知弘（下嶋研究室・M2）
国際水理学会 IAHR-Asia 2025 Best Presentation Award 吉田 凱（宮川研究室・M1）
アジア太平洋国際触媒会議（APCAT10）ベストポスター賞 島 謙斗（関根研究室・M1）
日本ゾル-ゲル学会第 23 回討論会 ベストポスター賞 筒井 瑠子（下嶋研究室・M1）
日本マイクログラビティ応用学会 第 37 回学術講演会（JASMAC-37）毛利ポスターセッション敢闘賞 佐々木 海夏翔（鈴木研究室・B4）
日本マイクログラビティ応用学会 第 37 回学術講演会（JASMAC-37）毛利ポスターセッション最優秀毛利賞 市川 文彩（鈴木研究室・B4）
日本マイクログラビティ応用学会 第 37 回学術講演会（JASMAC-37）毛利ポスターセッション奨励賞 堀越 晴貴（鈴木研究室・M2）
日本マイクログラビティ応用学会 第 37 回学術講演会（JASMAC-37）毛利ポスターセッション優秀毛利賞 上野 遥か（鈴木研究室・M1）
MetFoam2025 13th International Conference on Porous Metals and Metallic Foams BEST POSTER AWARD 2nd PLACE 平沼 拓也（鈴木研究室・M1）

【学生】

日本マイクログラビティ応用学会 第 37 回学術講演会（JASMAC-37）毛利ポスターセッション優秀賞 的場 創（鈴木研究室・B4）
日本セラミックス協会 日本セラミックス協会第 38 回秋季シンポジウム 優秀発表賞 鯉川 智生（山本研究室・D1）
日本ガスタービン学会 第 53 回日本ガスタービン学会定期講演会 日本ガスタービン学会学生最優秀講演賞 大矢野 静奈（鈴木研究室・M2）
腐食防食学会 第 72 回材料と環境討論会 若手講演奨励賞 TRAKULDIT Supicha（鈴木研究室・D3）
ASIAN Fluid Machinery Committee AICFM18 Best Presentation Award 児玉 一騎（宮川研究室・M2）
CON-EX2025 優秀ポスター賞 坂道遼 萌（細井研究室・M1）
第 29 回ケイ素化学協会シンポジウム ポスター賞 柴田 明璃（下嶋研究室・M1）
第 29 回ケイ素化学協会シンポジウム ポスター賞 筒井 瑠子（下嶋研究室・M1）
日本マイクログラビティ応用学会 第 37 回学術講演会（JASMAC-37）学生口頭発表 最優秀賞 門井 洸衛（鈴木研究室・D1）
公益社団法人日本セラミックス協会 優秀発表賞 沖田 知弘（下嶋研究室・M2）
日本化学会 第 15 回 CSJ 化学フェスタ 2025 優秀ポスター発表賞 堀口 太裕（関根研究室・M1）
一般社団法人 ターボ機械協会 第 93 回松江講演会 若手優秀講演賞 荒井 友也（宮川研究室・M1）
一般社団法人 ターボ機械協会 第 93 回松江講演会 若手優秀講演賞 吉田 凱（宮川研究室・M1）
一般社団法人 ターボ機械協会 第 93 回松江講演会 若手優秀講演賞 阪井 健人（宮川研究室・D3）
8th International Symposium on Frontiers in Materials Science Oral Presentation Award for Young Scholar 鯉川 智生（山本研究室・D1）
腐食防食学会 第 72 回材料と環境討論会 若手講演優秀賞 福田 涼介（山本研究室・M2）
8th International Symposium on Frontiers in Materials Science Poster Presentation Award 新宮 やよい（山本研究室・M2）
第 44 回無機高分子研究討論会 学生講演賞 鈴木 麻由（下嶋研究室・M2）
日本化学会 第 15 回 CSJ 化学フェスタ 2025 優秀ポスター発表賞 筒井 瑠子（下嶋研究室・M1）
第 32 回ゼオライト夏の学校 高石哲男記念賞（優秀ポスター賞） 本道 和樹（下嶋研究室・M1）
日本化学会 第 15 回 CSJ 化学フェスタ 2025 優秀ポスター発表賞 本道 和樹（下嶋研究室・M1）
日本ゼオライト学会 第 41 回 ゼオライト研究発表会 若手優秀講演賞 本道 和樹（下嶋研究室・M1）
21st International Conference on Diffusion in Solids and Liquids (DSL2025) Best Poster Award (1st place) 川嶋 啓太（鈴木研究室・M2）
日本金属学会 第 8 回第 7 分野講演会 優秀ポスター賞 新宮 やよい（山本研究室・M2）
第 44 回無機高分子研究討論会 学生講演賞 柴田 明璃（下嶋研究室・M1）
日本マイクログラビティ応用学会 第 37 回学術講演会（JASMAC-37）奨励賞 川嶋 啓太（鈴木研究室・M2）
日本金属学会 第 8 回第 7 分野講演会 奨励ポスター賞 嶋田 翔（山本研究室・M2）
一般社団法人 日本機械学会 三浦賞 杉原 大樹（岩瀬研究室・M2）
公益社団法人 計測自動制御学会 SICE 優秀学生賞 堀越 晴貴（鈴木研究室・M2）
一般社団法人 日本機械学会 畠山賞 小澤 朋生（細井研究室・B4）
電気学会 電気学会学術奨励賞 宮澤 怜（小林研究室・B4）
日刊工業新聞社 第 26 回理工系科学技術論文コンクール優秀賞 杉原 大樹（岩瀬研究室・M2）
日本機械学会関東支部第 65 回学生員卒業研究発表講演会 Best Presentation Award（学生優秀発表賞） 坂本 麗衣（細井研究室・B4）
日本機械学会関東支部 第 32 期 総会・講演会 若手優秀講演賞 堀越 晴貴（鈴木・権藤研究室・M2）

※2025 年度の受賞者を掲載しておりますが、一部 2024 年度の受賞者を含む場合があります。 ※受賞者の情報は、受賞時の情報で記載しております。（一部除く）