

UACJ 発足後 10 年間の研究開発成果の概要

内田 秀俊*, 児島 洋一**

Progress in R&D during the Last Ten Years
since the Establishment of UACJ

Hidetoshi Uchida* and Yoichi Kojima**

1. 緒 言

2013年10月1日に古河スカイ株式会社と住友軽金属工業株式会社が統合して株式会社UACJが誕生した。当時、研究開発部門は技術開発研究所としてスタートして翌2014年に「UACJ Technical Reports Vol. 1」創刊号を発刊した。それ以来、毎年刊行を継続できしており、昨年度Vol. 10を10周年記念誌として発行した。

これを機会にUACJ発足後10年間の研究開発成果をまとめることとし、ここに発行できることを大変うれしく思う。

ここでは古河スカイ、住友軽金属からの研究開発活動を踏まえて、この10年間の研究開発活動の概要をまとめた。いずれの活動においても環境対応の技術開発が多く盛り込まれている。代表例としては環境負荷を低減した次世代の飲料缶蓋「EcoEnd™」の東洋製罐との開発、自動車のパネルに使われるアルミニウム板を日産自動車やトヨタ自動車との間でクローズドループリサイクルするプロセスの開発、従来再利用が困難であった自動車熱交換器用材料のクラッド材において、そのスクラップを配合しやすいリサイクル標準材の開発であり、空調熱交換器用材料においてもアルミニウム配管の開発が進んでいる。

リサイクル等の環境対応には、材料開発だけでなく製造プロセスや応用技術の改善も欠かせない。リサイクル材を多用した素材では不純物が混入しやすく、性能が従来材より低下することに加え、再生時の工程で製造効率が低下するなどの問題があり、これらの改善が求められる。

板プレス成形シミュレーションでの割れ予測による

金型改善や塗装付き熱交換器用材料の再生における溶解鑄造時のドロス発生抑制技術などがそれにあたる。

リサイクル関連技術とともに進化しているものがDX (Digital Transformation) である。各分野のシミュレーション技術やビッグデータ活用による解析技術が進化し、今後AIの活用も含めて大きな変革期になることが予想される。センシング等のデータ取得技術も益々発達していくと思われる。

当社の本業であるアルミニウム素材の研究開発も多く実施されており、自動車材等の6000系合金の時効析出、集合組織制御による曲げ加工改善などがあげられる。また、本誌ではアルミニウム合金開発の歴史を航空機材に用いられている超々ジュラルミンの開発やその背景についても各号で取り上げた。今後の2030年、2050年を見据えた研究開発の参考となることを期待するとともに、環境対策を始めとする目標を達成することでアルミニウム産業発展の貢献の一助になることを期待したい。

2. 研究成果

2.1 材料・製品とその関連技術

2.1.1 缶用材料

国内における飲料用アルミ缶の需要は2016年を境に減少し、2023年度は210億缶となった。これは人口減少や、物価上昇による消費抑制、ペットボトルコーヒの普及などが影響したと考えられる。一方、世界では海洋汚染問題から脱プラスチックの必要性が叫ばれるようになり、一部でペットボトルに代わってアルミ缶を採用する動きが見られるようになった。また、

* 理事 R&D センター 所長 博士 (工学)
Operating Officer, Chief Executive, Research & Development Center, Marketing & Technology Division, UACJ Corporation, Dr. Eng.

** 理事 R&D センター フェロー 博士 (工学)
Operating Officer, Fellow, Research & Development Center, Marketing & Technology Division, UACJ Corporation, Ph. D.

2015年にSDGsが国連で採択され、環境意識がこれまで以上に高まったことで、リサイクルに適したアルミ缶の価値が見直されはじめた。IMARC (The International Market Analysis Research and Consulting) Groupが発行した最新のレポートによると、世界のアルミ缶市場は2024～2032年に平均2.9%/年にて成長すると予測されている。当社はタイに圧延工場 (UACJ Thailand) を立ち上げ、アメリカの生産拠点 (TAA-LOGAN) とともに増産投資をした。日本、アメリカ、タイから高品質の缶材を提供できる生産体制を構築し、世界的な缶材の需要拡大に対応している。

(1) 世界のアルミ缶品質に適合する材料の研究開発

海外の缶メーカーへの安定した材料供給のため、国内とは異なる品質課題の原因究明、改善に対応した。例えば、国内の缶蓋の多くはフルフォームと呼ばれる形状であるが、海外ではCDL社が開発した小径の缶蓋形状 (以後CDL蓋) が主に採用されている。使用されている板厚も薄く、かつ、高い強度と成形性の材料が求められる。当社はCDL蓋の金型をR&Dセンターに導入し、品質課題のメカニズム解明や材料特性の影響評価に活用した。それらの知見から高品質のCDL蓋用材料を製造できるようになった。

(2) ボトル缶用材料の研究開発の深化

海外ではスリム形状のボトル缶などが登場して成形自由度の高い材料が求められた。ボトル缶の成形様式や品質課題の研究を深めるため、2018年に量産型ボトルネッカーをR&Dセンターに導入した。材料組織と各種品質課題との関係を明らかにし¹⁾、不良率を低減する材料を開発した²⁾。この研究の過程では、缶壁の材料組織がボトルネッカーでの成形性に影響する可能性を見出した³⁾。また、缶壁の材料組織の発達過程を独自の方法で解析して国内外の学会で発表し、論文は令和2年度の軽金属論文賞を受賞した⁴⁾。リサイクル性やリシール性を併せ持つボトル缶は容器としての付加価値が高く、さらなる普及のため、缶メーカーと技術開発を推進していく。

(3) 缶のカーボンフットプリント削減に関する研究開発

アルミ缶の製造において環境負荷の大部分を占めているのは、アルミニウム新地金の製錬に係るCO₂排出量である。そのため、これまで以上の缶材料のゲージダウン (薄肉化) と、リサイクル率向上 (新地金使用率の削減) が最重要課題の一つとなった。

a) 缶材料のゲージダウン

缶胴においては、薄い板厚でも一定の内圧に耐える (耐圧) ために、缶底の加工 (ボトムリフォーム) が採用されるようになった。製品板厚や缶壁が薄いと、缶底に皺が発生したり (チャイム皺)、製缶時に缶壁が破断しやすくなる (破胴)。これらをともに改善するための材料設計の考え方を整理した⁵⁾。また、ゲージダウンのために総冷延圧下率が増加すると、材料の異方性が増加する傾向になる。成形条件との複合要因により、様々な品質課題が顕在化してくる³⁾。材料面では熱間圧延の制御により異方性を改善する方法を開発した⁶⁾。今後も缶の軽量化が求められる中で、生産性を損なうことなくこれらの課題を改善する製法の検討が必要になる。

また、缶体強度を高く維持するため、製缶工程における塗装焼付時の軟化量が小さい材料を検討してきたが⁷⁾、軟化現象には不明な部分が多かった。高分解能の分析装置を駆使することで、塗装焼付時の微細な組織変化を観測し、複雑な軟化挙動のメカニズムを説明し、影響する材料因子を示した。この結果を国内外の学会で発表し、論文は令和5年度の軽金属論文賞を受賞した⁸⁾。

b) 缶材料のリサイクル率向上

多様な合金を製造する国内の製造所に関しては、製造実績データを活用することにより、リサイクル性と材料特性の両面から合金の合理化方針を決めた。また、Si、Feなどの不純物量比が5182合金、3104合金の材料特性へ与える影響を研究した⁹⁾。缶の水平リサイクルの必要性を訴求するため、当社はサントリー、東洋製罐と共同で、缶由来の再生原料だけで製造された100%リサイクル缶のビールを世界で初めて発表し¹⁰⁾、限定生産した。その材料設計では上記の設計方針を考慮した。

缶蓋材には強度、成形性などの要求特性から、5182合金が歴史的に用いられてきた。一方、缶胴材を多く含むUBC (Used Beverage Can) の配合率を高めることができず、新地金使用率が高いことが課題であった。全体のリサイクル性を考えると、缶蓋に缶胴と同じ3104合金を使用する「ユニアロイ」が望ましいが、強度が低いためゲージアップ (材料コストアップ) が必要になるという経済的な障壁があった。当社は東洋製罐と缶の水平リサイクル推進に共同で取り組む業務提携を締結し、その一環としてこの課題に取り組んだ。缶蓋材料においては①成分を缶胴材に近づけること、②5182合金同等強度でゲージアップを必要としないこと、なおかつ③缶蓋の成形が可能であることを目標とした。国内フルフォーム蓋向けの材料¹¹⁾と成形方法を

共同で開発し¹²⁾、新地金使用量の削減、リサイクル原料の使用増により、GHG (Greenhouse Gas, 温室効果ガス) 排出量を約4割削減可能な缶蓋として「EcoEnd」を発表した¹³⁾。The Canmaker Magazineが主催する「The Canmaker Cans of the Year Awards 2024」においてSustainability部門を含む3賞を受賞し、国際的に高い評価を得た。その後、国内ビール4社からEcoEndをビール類に採用することが発表された^{14)~17)}。欧州でも軽圧4社とEAPG (the European Aluminium Packaging Group) 合同で開発の表明があり¹⁸⁾、世界的に本課題への取り組みが熱を帯びている。

缶材料のリサイクル率を高めるために、当社では上記のような材料設計に加え、UBC処理設備への投資など各種施策を進めてきた。今後はアルミスクラップの分離技術や不純物の無害化技術¹⁹⁾、除去技術²⁰⁾を開発し、缶材料への適用と業界全体のマテリアルフローを検討していく必要がある。

(4) 食品安全規制に対する研究開発

近年、欧米を中心に食品包装におけるビスフェノール類や有機フッ素化合物 (PFAS) の溶出規制の厳格化が進み、一部の国や州では食品包装への使用禁止が制度化された。当社は塗料メーカーや缶メーカーの協力のもと、懸念化学物質を使用しない塗装缶蓋材をグローバルに提供できる体制を構築している。(工藤智行)

参考文献

- 1) 工藤智行, 田中宏樹: ぷらすとす, **4** (2021), 222-226. 本誌, **9** (2022), 41-46.
- 2) 例えば工藤智行, 小林亮平: 特許第7138179号
- 3) 工藤智行: ぷらすとす, **6** (2023), 29-33. 本誌, **11** (2024), 掲載予定
- 4) 小林亮平, 工藤智行, 田中宏樹: 軽金属, **69** (2019), 387-392. 本誌, **7** (2020), 17-23.
- 5) 例えば上野洋一, 鈴木 覚: 特許第6912886号
- 6) 例えば小林亮平, 鈴木 覚, 大場建徳: 特許第7138396号
- 7) 例えば岩村信吾: 特許第6898254号
- 8) 工藤智行, 吉田英雄, 田中宏樹: 軽金属, **72** (2022), 585-592. 本誌, **10** (2023), 75-84.
- 9) 江崎智太郎, 工藤智行: 軽金属学会 第142回春期大会講演概要, (2022), 219-220.
- 10) <https://www.uacj.co.jp/release/20220831.htm>
- 11) 例えば工藤智行, 竹澤巧基, 田添聖誠, 江崎智太郎: 特開2023-131622
- 12) 例えば中野修治, 高橋成也, 西本英樹, 磯村遼太郎, 興 敬宏, 江崎智太郎, 工藤智行, 田添聖誠: 特願2024-016483
- 13) <https://www.uacj.co.jp/release/20231204.htm>
- 14) <https://www.asahibeer.co.jp/news/2024/1210.html>
- 15) https://www.kirinholdings.com/jp/newsroom/release/2024/1210_01.html
- 16) https://www.sapporobeer.jp/news_release/0000017320/
- 17) <https://www.suntory.co.jp/news/article/14715.html>

18) <https://www.novelis.com/novelis-signs-agreement-to-boost-the-circularity-of-beverage-cans/>

19) 例えば原田陽平, 熊井真次: 軽金属, **73** (2023), 470-480.

20) 例えば布村順司, 兒島洋一: 化学工学, **88** (2024), 117-120.

2.1.2 自動車用材料

近年、地球環境保護の観点より、以前にも増して輸送機器の軽量化が重要となってきた。自動車においては、車体の大型化が進み、安全性や利便性向上のための各種機器の搭載により車体重量が増え、更に高重量のバッテリー機器を搭載した電気自動車等が普及することで、車体軽量化が重要となっている。また、LCA (Life Cycle Assessment) に基づき、全てのプロセスでのCO₂排出量を考慮する考えが浸透し、リサイクル性も重要な課題となっている。

アルミニウム合金の適用部位は、エンジン部品、ホイール、サスペンション、熱交換器、バンパー^{1),2)}など多岐に渡る。特に適用が拡大しているのはボディパネルであり、一例として、2021年発売のトヨタランドクルーザーではフード、フェンダー、ドア、バックドア、ルーフに³⁾、日産ローグ (北米仕様) ではフード、フェンダー、ドアにアルミニウムが採用⁴⁾されている。アルミニウム適用部位の拡大に対応するため、福井製造所に熱処理以降の設備を備えた新工場棟を建設し、2020年に供給を開始している⁵⁾。

自動車ボディパネル用アルミニウム合金板における最近10年の動向に関して、材料・成形・接合の観点から述べる。

(1) 材料

材料の強度向上、成形性向上のニーズは常に有るが、現在最も重要な課題はCO₂発生量削減である。各自動車メーカーは電動化シフトとともに、概ね2050年のカーボンニュートラル達成を目標として設定している。アルミニウムの製造工程におけるCO₂発生量の約90%は、アルミニウムの新地金製錬工程にて発生する。製造時に発生するスクラップ (In-house Scrap, New Scrap) や市場で発生する各種スクラップ (Old Scrap) を活用し、新地金使用率を下げることで、CO₂発生量を大幅に削減することができる。トヨタ自動車と共同開発した「低CO₂リサイクルアルミ材」では、これまで鋳物材にカスケードリサイクルしていた異種金属を積層した製品 (クラッド材) のスクラップ等 (In-house Scrap) を活用し、CO₂排出量を約50%削減することに成功した。本開発材は、2020年発売のMIRAIフードインナに採用された⁶⁾。リサイクルアルミニウム材のボディパネルへの適用は国内初である。また、スクラップ還流のス

キーム構築に関する取組みが開始され、自動車メーカーで発生したプレス端材スクラップ (New Scrap) を回収し、原料として再利用するクローズドループ・リサイクルの適用が開始された^{3), 4)}。

リサイクルの最も望ましい形は、使用済み廃自動車 (ELV: End of Life Vehicle) のスクラップ (Old Scrap) を再利用して自動車用材料を製造することである。ELVは、解体・破碎され、様々な選別方法を用いて、材料ごとに選別され、再生材を作り出す。しかし、アルミニウム合金板においては、選別精度が十分では無く、ELV由来のOld Scrapの水平リサイクルは実現できていない。近年、各合金系の選別が可能であるLIBS (Laser-induced Breakdown Spectroscopy) 選別機の性能向上が進み、磁力選別、比重選別、XRT選別などの選別手法と組み合わせることで、選別精度の向上が期待される。当社は水平リサイクルの実現に向けた取組みの一環として、産官学連携推進事業⁷⁾や自動車リサイクル高度化財団の事業⁸⁾へ参画している。

(2) 成形

一般に、アルミニウム合金板は、鋼板に比べて、プレス成形性に劣る。組織制御による材料特性の改善に加え、成形方法の開発も必要となる。冷間プレス成形においては、トヨタレクサスLSのドアインナにて、絞り工程を2回に分ける工法により、高難易度の一体成形を可能とした⁹⁾。板の一部を200～300℃に加熱する温間成形、500℃程度の高温でガス圧を用いて成形を行う熱間ブロー成形等の技術も開発されている¹⁰⁾。

また、成形シミュレーションを高精度化することで、プレス成形用金型の設計工数を削減することが可能となり、アルミニウム合金板の使い易さが向上する。その一環として、アルミニウム合金板の成形限界を正確に評価する手法の提案^{11), 12)}、プレス成形時の破断挙動に影響を及ぼす因子の解明^{13), 14)}などの取組みを行っている。

(3) 接合

自動車は多くの部品から構成されており、同種、異種の接合部が多数存在する。そのため、溶融溶接、固相接合、機械締結など様々な接合方法が適用される。固相接合の一つである摩擦攪拌接合 (FSW) を用いて、板厚の異なる複数枚のアルミニウム合金板をつなぎ合わせたテーラードブランクを作製し、一体プレス成形する工法が実用化¹⁵⁾されており、材料歩留の向上及び部品点数の削減に寄与している。

要素技術開発としては、レーザ溶接部及びその近傍

における割れ低減方法の提案^{16), 17)}、FSWで使用するツールの開発^{18), 19)}などの取組みを行っている。

また、車体のマルチマテリアル化が進み、異材接合が多くなるにつれてセルフピアッシングリベット等の部品を使用する接合方法が採用される傾向にある。部品の多くは鉄系であり、水平リサイクルを行う際の障害となることが予想される。そのため、今後は、部品を使用しない異材接合法の開発、容易に部品を解体できる接合方法の開発などが望まれる。(木村 剛)

参考文献

- 1) 田中晃二：本誌，**2** (2015)，182-184.
- 2) 田中晃二，雑賀正章：本誌，**10** (2023)，166-167.
- 3) <https://www.uacj.co.jp/release/20210805.htm>
- 4) <https://global.nissannews.com/ja-JP/releases/release-47bd1d4c8b3256fcee533e433e0ad50a-210122-01-j>
- 5) https://www.uacj.co.jp/release/20200708_02.htm
- 6) 西川直樹，増田勇也，大竹和実，蔵本 遼，山崎裕貴，永井建史：TOYOTA Technical Review，**66** (2021)，92-95. 本誌，**8** (2021)，62-65.
- 7) <https://www.uacj.co.jp/release/20240409.htm>
- 8) https://j-far.or.jp/wp-content/uploads/2024_Attachment1.pdf
- 9) Motor Fan illustrated, Vol. 138 (2018), 042-043
- 10) 工藤智行：本誌，**1** (2014)，131-133.
- 11) 劉 午陽，紀藤 航，八野元信，浅野峰生：2024年度塑性加工春季講演会概要，(2024)，31-32.
- 12) 劉 午陽，浅野峰生：第75回塑性加工連合講演会，(2024)，35-36.
- 13) 井手達也，中西英貴，八野元信，浅野峰生：2024年度塑性加工春季講演会概要，(2024)，187-188.
- 14) 井手達也，中西英貴，浅野峰生：第75回塑性加工連合講演会，(2024)，27-28.
- 15) <https://www.cho-monodzukuri.jp/award/archive/2016/automobile.html>
- 16) 池田剛司，江崎宏樹：特許第7132829号，(2022).
- 17) 池田剛司，江崎宏樹：特許第7132830号，(2022).
- 18) 近野佑太郎，福田敏彦：特許第7008392号，(2022).
- 19) 坂井一成，松原和男，江崎宏樹，福田敏彦：特許 第7084830号，(2022).

2.1.3 自動車熱交換器用材料

自動車熱交換器分野を取り巻く環境はここ10年で大きく変化している。自動車の電動化が進み、内燃機関に代わる熱源確保や電池冷却が必要になり、従来よりも車両全体での効率的な熱マネジメントが重要視され始め、チラー、電池冷却器などの新たな熱交換器が登場し多様化している。材料に対しては依然として強度と耐食性の向上による薄肉化が求められるが、限界を迎えつつある。一方でろう付技術の革新に向けた開発も盛んに行われている。グローバルで見ると、中国材の技術力が向上して価格競争力が増したことで従来の

高機能材のコモディティ化が起きている。これに対し、当社ではフラックスフリーろう付、単層ろう付材など、付加価値技術の開発に注力してきた。また近年では気候変動対策として環境負荷低減材のニーズが高まっており、業界に先駆けてリサイクル材を開発した。これらに対する当社の取組みについて順を追って解説する。

(1) フラックスフリーろう付技術開発

マグネシウムはアルミニウム合金の添加元素として高強度化に極めて有効だが、現在主流のフッ化物系非腐食性フラックスを用いた雰囲気ろう付に悪影響を及ぼす。その理由は、マグネシウムがフラックスを不活性化して酸化皮膜破壊を阻害しろう付性を低下させるためである。一方で材料中のマグネシウムは非酸化性雰囲気においてアルミニウム表面の酸化皮膜破壊作用があるため、フラックスを使用せずともろう付（フラックスフリーろう付）が可能である。

従来のフラックスろう付では溶融フラックスがアルミニウム表面を被覆し再酸化を防止するが、フラックスフリーろう付においては酸化皮膜破壊後の保護膜がないため、ろう付炉内の酸素濃度や水分濃度が高いとろう付温度に到達する前に再酸化し接合が阻害される。これらを体系的に理解するために、低酸素・低露点を実現可能かつその場観察可能な小型雰囲気加熱炉を導入した¹⁾。これにより各ろう付条件における酸化皮膜の破壊・再酸化挙動を可視化でき、熱交換器メーカーのろう付炉に合わせた合金設計が可能となった。また、熱交換器コアをろう付可能な大型のフラックスフリー専用炉を導入し、立体形状でのろう付性検証に用いた。その結果、低温ラジエーターのインナーフィン用としてフラックスフリー材料の量産化に成功した。

(2) 単層ろう付材実用化

従来のブレージングシートはAl-Si系合金を皮材としてクラッドする多層材が一般的であったが、単層でろう付機能を有しつつ強度も担保可能な材料（MONOBRAZE[®] 材）を開発した^{2), 3)}。ろう付温度での液相率は10～15%であり、ろう付性の観点から板厚の薄いクラッドフィン材を代替し得る。性能面では、亜鉛溶射チューブと組み合わせた腐食環境において、クラッドフィン材に比べてフィンが剥離・脱離しにくく、チューブの防食に有利であることを確認した⁴⁾。製造面では、単層であるためクラッド材に比べて工程を簡素化できる。また、クラッド材は異なる複数の合金を含むため、製造工程で発生する端材やスクラップ（これらをまとめてBRスクラップと呼称）を皮材あるいは心

材など単一合金の溶解原料として使用しにくい⁵⁾が、単層材の場合はそのまま溶解原料にできるため、リサイクル性が高い。

2014年に国内でコンデンサーフィン材として初めてMONOBRAZE材が採用された。その後、技術供与先である乳源東陽光精箔有限公司（中国）で連続鋳造法（CC）にて製造方法を確認し、2019年より中国域内の自動車熱交換器メーカー向けに量産開始した。2024年現在で1000 MT/月以上の生産量であり中国市場を席捲している。現在はELVALHALCOR（ギリシャ）、UACJ (Thailand) Co.,Ltd.（タイ）からの供給開始に向けて製造条件確立中である。

(3) 熱交to熱交リサイクル技術開発

前述のようにBRスクラップは異なる複数の合金を含む。このため、単一合金の溶解原料として使用するにはアルミニウム新地金を使用して合金成分を調整（薄める）しなければならないが、新地金はその製造時にCO₂排出量が多く、使用量の削減が望まれている。

そこでこれらの対策として、BRスクラップを配合しやすい組成の合金開発を進め、用途に応じて数種類のラインナップを準備した（リサイクル標準材）。現在、複数の顧客にて開発材の適用可否が検討されている。

また、社外との連携として環境省公募事業である「令和5年度自動車リサイクルにおける再生材利用拡大に向けた産官学連携推進事業」にアルミメカとして参画している⁶⁾。本事業では廃自動車を精緻解体して取り出した部品・材料の再資源化に向けた技術検証を進めている。本事業を活用して熱交換器の再資源化における技術課題を抽出し、事業メンバー内で共有して課題解決を図りながら再資源化スキーム確立を目指す。

（山本 大）

参考文献

- 1) 鈴木太一，山吉知樹，柳川 裕：軽金属学会 第137回秋期大会講演概要，(2019)，111-112.
- 2) 黒崎友仁，村瀬 崇，寺山和子，石 雅和，戸次洋一郎，二宮淳司，新倉昭男：軽金属，**68** (2018)，125-132. 本誌，**5** (2018)，45-54.
- 3) 黒崎友仁，村瀬 崇，寺山和子，戸次洋一郎，二宮淳司，新倉昭男：軽金属，**69** (2019)，249-254. 本誌，**7** (2020)，30-36.
- 4) 小路知浩，戸谷友貴，土公武宜，尾崎良太：軽金属学会 第144回春期大会講演概要，(2023)，1-2.
- 5) 山崎裕貴，永井健史，蔵本 遼，中西英貴，竹田博貴，浅井千尋，倉本 剛，西川直樹，増田勇也：軽金属，**73** (2023)，175-179. 本誌，**8** (2021)，62-65.
- 6) <https://www.uacj.co.jp/release/20240409.htm>

2.1.4 空調用フィン材

近年、日本の人口は減少傾向であるが、一家庭あたりのエアコン保有台数が増加していることから、今後エアコンの需要は現状維持で推移すると予想されている。海外では人口増加に伴ってエアコン需要は拡大し続けており、特に顕著なアジア、アフリカ地域においてエアコンメーカー各社が市場拡大を目指している。

欧州では、地球温暖化防止や環境保全への意識の高まりから、省エネルギーを謳ったエアコンやヒートポンプ式暖房給湯が伸長する見通しである。

エアコンの価格低減は国内外共通の課題であり、素材に関しては、従来熱交換器の冷媒用配管として用いられてきた銅の価格高騰により、アルミニウム配管への代替が進んでいる。また、熱交換器の小型化や省冷媒に効果が期待できるアルミニウム製のパラレルフロー型熱交換器（以下PF熱交換器）の適用も進んだ。

エアコン室内機及び室外機の熱交換器用フィンには有機及び無機塗膜がプレコートされたアルミニウム板が用いられている。塗膜にはフィン間への結露水滞留による熱交換性能の低下や、腐食による寿命の低下を防止するため親水性や耐食性が求められることが多いが、エアコンメーカーの思想、適用機種（高級か安価か、室内か室外か、など）、地域によって難着霜性、耐汚染性などが要求されることもあり、それぞれに対応するための塗膜開発を進めてきた。

(1) 自浄性フィン材

日本国内のエアコンは、高級志向からエアコンメーカーが清潔性を訴求するため、耐汚染性フィン材の需要が高い傾向があり、当社として自浄性フィン材¹⁾を開発し量産している。自浄性フィン材は、エアコン冷房運転時に熱交換器フィン表面に発生する結露水によって、フィン表面に付着した油汚れが洗い流される特長を持つ。特別な洗浄作業を行うことなく汚れが除去されるため、「自浄」と呼ばれる。自浄性を発現するコンセプトは、油汚れを結露水で浮かせるイメージから撥油親水性とした。撥油親水性を有する塗膜成分として、樹脂の官能基に着眼し、親水性を発現する水酸基(-OH)と撥油性を発現するノニオン性官能基を有する樹脂を適用し、自浄性フィン材の技術確立した¹⁾。

(2) 耐粉塵付着性フィン材

高品質の位置づけとして耐粉塵付着性フィン材²⁾を開発し量産している。粉塵として、室内熱交換器であればホコリや油煙、室外熱交換器の場合には砂塵やPM2.5などを想定し、これら汚染物質の付着抑制を目

的としたフィン材である。これを達成するため、親水汚れとして関東ローム(JIS)、疎水汚れとしてカーボンブラックを用いた実験方法を確立した。塗膜開発のコンセプトは、塗膜表面の平滑性を上げることによって、付着表面積を小さくするとともにアンカー効果による付着力を抑制することにある。平滑性を上げることで親水性が低下するため、複数の樹脂成分における相溶性に配慮することで平滑性を制御し、耐粉塵付着性と親水性を両立した。

(3) 親水滑水性フィン材

寒冷地用室外熱交換器向けに難着霜性を有する親水滑水性フィン材³⁾を開発し量産中である。寒冷地では暖房運転時に室外熱交換器の表面に霜が形成し、熱交換器のフィン間が閉塞することによって、熱交換量が低下する。このため、除霜運転として、定期的に室外熱交換器の配管内にホットガスを流しているが、除霜運転時は室内熱交換器から冷風が発生するため快適性が損なわれる。そこで、結露水の排水性を上げることを目的とし、従来フィン材の特性である親水性に、滑水性を付与した親水滑水性フィン材を開発した。従来技術では、撥水性を付与することで滑水性が向上するが、撥水性とは相反する親水性に滑水性を付与するための塗膜設計のポイントは、塗膜表面の平滑性と成分均一性を制御することであり、これにより親水性と滑水性を両立できた。

(4) 安定供給を目的とした塗料原料の検討

水ガラス系プレコートフィン材について、当社は塗料原料にケイ酸リチウムを使用し量産してきた。近年の自動車用リチウム電池需要からリチウム価格が高騰していることや、レアメタルとしての供給不安から、原料をケイ酸リチウムからケイ酸ナトリウムへ変更することを検討した。その選定理由は、他の金属塩と比較し、リチウムと価数が同じで原子サイズが近いことから、塗料pH、塗膜形態、塗膜物性への影響が小さいためである。一方、ケイ酸ナトリウム適用の懸念点は、塗膜から溶出するアルカリ成分がリチウム塩の適用時より多くなり、銅管やアルミニウム管が腐食することであった。腐食への影響については、シミュレーション及び検証実験により懸念を払拭し、現在採用に至っている。

(5) 2拠点供給体制の確立

アジア地域やその他海外向けには安価な材料を供給できるよう、UACJ (Thailand) Co.,Ltd. ラヨン製造所に

て空調用フィン材の塗装ラインを2018年に立ち上げた。タイにおいて原料の現地調達化を含め、鋳造から塗装までの一貫生産が可能な体制を確立した。原料の現地調達性や設備の違いによる表面処理性の差を考慮した塗料を設計し、タイ独自塗料を使用しながらも名古屋製造所にて製造するプレコート材と互換性を有する塗膜を開発した。名古屋製造所、ラヨン製造所の2拠点での空調用フィン材の供給体制を確立した。

エアコン需要は冒頭に述べたように世界中で成長が予想されている一方で、地球温暖化をはじめとする環境意識の高まりや、CO₂排出量の抑制を目的としたCO₂関税の導入(EU炭素国境調整メカニズム(CBAM))とリサイクル材需要の高まり、アルミニウム配管を使用した熱交換器用の塗装材、環境規制による代替材適用といった、求められる材料要求にも変化が大きい。今後、環境の変化に対応したフィン材開発を進めていく。(藤村涼子)

参考文献

- 1) 世古佳也, 外山智章, 小澤武廣, 小山高弘: 特願2020-136589, (2020).
- 2) 世古佳也, 笹崎幹根: 特許第6887366号, (2021).
- 3) 萩原加奈, 藤村涼子, 笹崎幹根: 本誌, 5 (2018), 80-83.

2.1.5 箔用材料

厚さ0.2mm以下の板が箔と定義されており、アルミニウム箔は産業の進展とともに各種電子部品、食品、飲料容器、医薬品包材などの多様な分野に用途を広げてきた。直近10年では自動車のEV (Electric Vehicle) 化・電装化、IoT (Internet of Things)・DX (Digital Transformation)、サステナビリティ等の様々な変化に合わせて、各領域で使用されるアルミニウム箔の素材開発が進み、さらには産業の『モノからコト』への変化に合わせて、アルミニウム箔を用いた用途技術開発が進められてきた。

(1) リチウムイオン電池用(集電体用)箔

リチウムイオン電池(LIB, Lithium Ion Battery)は、携帯電話、ノートパソコンなどの携帯機器用途として普及してきたが、近年は、電動駆動車両(EV)に用いられる車載用途としての普及が拡大している。また東日本大震災における原子力発電所事故を契機に、定置用蓄電システム用途の需要も増加した。

アルミニウム箔が適用されているLIBの正極集電体は、正極活物質(LiCoO₂など)を担持し、電流を正極活

物質に供給する機能をアルミニウム箔が担っている。また、EV用途としては、航続距離を上げるため、ロールプレスにより正極活物質層の高密度化が行われる。この際、アルミニウム箔は圧縮変形を受けるため、高強度・高延性が求められる。これまで、高強度が要求される用途には、Mnを添加した3000系合金箔が適用されてきた。しかしながら、Mn添加により導電性が低下するため、集電体用アルミニウム箔としては好ましくない。そのため、導電性が良好な1000系合金あるいは8000系合金(Al-Fe合金)をベースとした高強度・高延性の集電体用アルミニウム箔を開発した¹⁾。

液系LIBに使用される集電体用アルミニウム箔は、グローバル調達の観点から、材質及び材料特性の統一性が求められるようになったが、全固体電池のような次世代の電池には新しい集電体用アルミニウム箔の開発が必要となる。

(2) アルミニウム電解コンデンサ用(電極用)箔

電気・電子機器に必要不可欠な電子部品である電解コンデンサの電極材には、高純度アルミニウム箔が用いられており、コンデンサ容量を増大させるため、アノードエッチングにより、トンネル状のピットが多数形成される^{2)~4)}。ピット形成に関して、従来から、アルミニウム表面に偏析した鉛付近から形成されることは知られていたが、鉛の表面偏析サイトについては明らかになっていなかった。この鉛の表面偏析サイトについて、低加速・高分解能FE-SEMという新しい解析装置を駆使し、広範囲にわたる鉛の表面偏析サイトの観察を行い、エッチング時のピット形成挙動を明らかにした⁵⁾。さらに、鉛の表面偏析挙動に及ぼす箔製造プロセスの影響を解明することで、安定した静電容量を達成できる電解コンデンサ用アルミニウム箔の製造を可能とした。

(3) 加工箔

印刷やコーティング素材・フィルム素材との貼り合わせなどを施した加工箔も当社の代表的な製品であり、食品包装や医薬品のPTP (Press Through Pack) 包装などに使用されている。この10年、医薬品の需要増加は顕著であり、より高度な安全性や安定供給の必要性が高まってきた。

安全性の観点では、小児や高齢者が容易かつ安全に服薬できるCRSF (Child Resistant & Senior Friendly) 対応のPTP包装、医薬品の真贋判定(偽造防止)に使用できるPTP包装を開発した⁶⁾。偽造防止技術としては、赤外線吸収インキを用いて、極小の点(ドット)で構成

される二次元コードをアルミニウム箔に印刷し、赤外線透過インキでコードを不可視化したドットコード印刷技術、及びドットを目で見ることができない大きさに微小化することで、隠蔽することなく表面にコードを印刷することができるマイクロドットコード技術を開発した。このコードは専用デバイスで読み取ることができ、固有のコードに紐づけられた情報を引き出すことができる。また、コードはデジタルメディアと接続可能であり、情報を音声や画像として出力することにより、高齢者や視覚障害者にとってやさしい包装となる。その他、事故防止や管理効率化を目的としたバーコード表示の義務化に対応しつつ、印刷色の自由度を高めるイージーバー[®]を開発した。

安定供給の観点としては、製薬メーカでの生産性を高める低温ヒートシールに対応したPTP包装用のアルミニウム箔を開発した。アルミニウム箔以外に、銅箔も生産している当社では、2020年のコロナ禍においては、医療施設で使用する抗菌銅箔や抗菌フィルムを開発し、市場に提供した⁷⁾。

(4) 開封検知箔

近年、世界的にヘルスケアのデジタル化が進められており、国内においても、医療情報のプラットフォーム化、遠隔診療などの政策が施行され、今後10年において、医療DXは大きく変化していくと推測される。当社では、医療DXの内、服薬のDXへ貢献すべく、PTP包装の開封情報を通知するアルミニウム箔・通信技術/クラウドシステムからなる「開封検知箔」の開発を進めている。これは、患者がPTP包装を開封した際、錠剤の包装材であるアルミニウム箔の破断を検知し、その情報を家族や医師に通知することで、遠方でも服薬状況を管理できるようにするシステムである。アルミニウム箔の破断を検知・通信するため、グラビア印刷でアルミニウム箔上に導電インキを印刷し、回路を形成する技術を新たに確立した。開封検知技術には、①ユーザでの読み取り作業が不要、②汎用性が高い、③メンテナンスフリーの3つの特徴がある。医薬品資材の開封検知にて実用化が始まっており⁸⁾、今後、セキュリティや通販サプリメント、物流等の様々な分野での適用の可能性がある。

(5) アルミニウム箔製品のリサイクル技術の開発

ここ数年は、環境側面への影響を考慮し、アルミニウム箔を使用した製品のリサイクル技術開発に着手しており⁹⁾、加工箔においては、複合材の分離技術や分離容易な包装形態の開発などを進めている。さらには、

大学との共同研究にて、PTP包装の回収、分別システム構築を試行中であり¹⁰⁾、持続可能な社会の実現に向けた取り組みは、今後ますます重要になると思われる。

(本居徹也)

参考文献

- 1) 本居徹也, 田中宏樹, 加藤 治: 本誌, **1** (2014), 125-130
- 2) 大澤伸夫: 本誌, **2** (2015), 21-27
- 3) 大澤伸夫: 軽金属, **73** (2023), 62-68. 本誌, **11** (2024), 掲載予定
- 4) N. Osawa: Mater. Trans., **65** (2024), 825-836.
- 5) 大澤伸夫, 富野麻衣, 林 知宏, 上田 薫, 本居徹也: 表面技術, **73** (2022), 504-511. 本誌, **10** (2023), 107-116.
- 6) 西尾 宏, 北田有希絵: 本誌, **3** (2016), 114-115.
- 7) 小石川敦史: 本誌, **7** (2020), 74-76.
- 8) 小石川敦史: 本誌, **9** (2022), 60-62.
- 9) 尾志立保子: コンバーテック, **51-12** (2023), 16-17.
- 10) NIKKEI Drug Information, **08** (2023), 22-24.

2.1.6 熱交換器

ルームエアコンやパッケージエアコン用冷媒として広く用いられているHFC (Hydrofluorocarbon, ハイドロフルオロカーボン) 類による地球温暖化防止のため、HFC類の段階的規制が国際的に進められており、空調機の省冷媒化及び地球温暖化係数の低いHFO (Hydrofluoroolefin, ハイドロフルオロオレフィン) 類が適用されてきている。また、CO₂排出量削減の観点から、エアコンシステムの省エネルギー化が課題となっている。空調機の重要な構成要素である熱交換器には省冷媒化及び省エネルギー化を目的とした小型・高性能化が強く求められ、近年ではパラレルフロー型熱交換器 (以下PF熱交換器) が注目を集めている。従来の空調用熱交換器ではアルミニウム製プレートフィンに銅製円管を拡管により接合しているのに対し、PF熱交換器ではアルミニウム製コルゲートフィン及び扁平多穴管を一体ろう付することで、熱交換器の伝熱性能向上、材料コストの削減及び省冷媒化が可能である。このため、冷房専用エアコンでは室外機凝縮器のPF熱交換器への転換が積極的に進められている。それに対して当社は、自動車熱交換器用材料開発で培った材料開発及びろう付に関する技術、熱交換器高性能化形状設計技術、熱交換器性能評価技術を活かして、市場で競争力があるPF熱交換器を設計・開発し、製品化に取組んだ。熱交換性能については、まず冷媒側の高性能化として、凝縮性能に特化した扁平多穴管形状を設計し、熱交換性能を向上させる形状を見出した¹⁾。また熱交換器の温度分布をできる限り無くして、熱交換器全面で熱交換させるために、熱交換器内を流動する冷

媒の流れを制御する方法を見出し、高性能化を果たした^{2), 3)}。次に空気側の高性能化として、コルゲートフィンの最適な形状を設計した。また、これら冷媒側及び空気側の熱抵抗を考慮した高精度なシミュレーション手法を開発し、設計効率を向上させた⁴⁾。もう一つの重要な要素である耐食性については、ろう付加熱後にフィン、ろう材、扁平多穴管表面及び扁平多穴管心材が最適な電位バランスとなる、すなわち扁平多穴管を腐食させない材料及びろう付条件を見出した。これにより、SWAAT (Sea Water Acidified Test) 6000 h 後でも漏れが発生しない熱交換器を開発した。熱交換性能及び耐食性を十分に検討した熱交換器を2015年にタイにおいて市場へ投入した。しかし、2020年に当社はこの事業から撤退したため熱交換器開発も中止することとなった。

カーエアコン用冷媒においても同様に、HFC類からHFO類への転換が進んでいる。HFO類はHFC類に比べて熱交換性能が低いことから、エアコンシステム内に補助熱交換器を組み込むことでシステム性能の維持・向上が図られている。その熱交換器が内部熱交換器 (Internal Heat Exchanger, 以下IHX) であり、蒸発器出口における低温のガス冷媒と凝縮器出口における高温の液冷媒とを熱交換させるものである。カーエアコンシステムにおいては、一般的にアルミニウム製の二重管式IHXが使用されており、その多くは、外面が平滑な円管を内管に、内面リブを管軸方向に付与した押出材を外管にして組合せた形状である。これに対して当社は、らせん形状を付与した内管と内面が平滑な外管を組合せたIHXを開発した⁵⁾。内管の形状及び二重管の断面形状を検討することにより、一般的に使用されているIHXに対して12%以上の熱交換性能向上効果を得ることを確認した。また、内管に付与するらせん形状の加工においても、断続的に効率よく且つ変形を抑制する製作方法を見出した。本製品は、2026年に量産が決定している。

モビリティ分野においては、前述したエアコン用熱交換器以外にインバーター用の冷却器として、6000系合金を用いたろう付で製造可能なクローズドタイプの冷却器を開発した。

産業分野においても絶えず高性能化の要求があり、設備電源や鉄道用途として多くの空冷及び水冷ヒートシンクを設計した。中でもメンテナンスフリー、省電力の観点からファンを使わない自然空冷方式への関心が高まり、自然空冷用ヒートシンクの高性能化に取組んだ。一般的に使用されている空冷用ヒートシンクは、熱源が接触するベース面からその反対側にくし状突起

を設けて、押出により製作するものが多い。ヒートシンクの熱伝達性能に及ぼす影響因子は空気側熱伝達率と表面積である。当社は空気側熱伝達率を向上させるべく、V字フィンヒートシンクを開発した⁶⁾。ヒートシンクのベース面からV字に配列した突起をつけ、フィン間を流れる空気の流速を上げることにより空気側熱伝達率を向上させた。また本形状は同等の冷却性能を有するくし型ヒートシンクよりも38%の軽量化に成功した。

定置型冷房専用エアコンの室外オールアルミ熱交換器、自動車用内部熱交換器・水冷冷却器、産業用ヒートシンクの開発例を挙げた。熱交換に関する課題は様々な分野・領域に存在し、またその発熱量は年々増加傾向にあることから、ここで述べた分野に限らず様々な熱交換器開発を今後も進めていく。(水田貴彦)

参考文献

- 1) 水田貴彦, 柿山史郎: 2012年度日本冷凍空調学会年次大会講演論文集, (2012), A145.
- 2) 外山智章, 水田貴彦, 渡邊貴道: 2013年度日本冷凍空調学会年次大会講演論文集, (2013), A211.
- 3) 外山智章, 水田貴彦: 2014年度日本冷凍空調学会年次大会講演論文集, (2014), C322.
- 4) 榎田 晃, 外山智章, 深田紗代, 片平史郎, 水田貴彦: 本誌, 8 (2021), 53-61.
- 5) 片平史郎, 秦 哲郎, 中村拓郎: 特許第6823906号, (2021).
- 6) 秦 哲郎, 木村直樹, 大高幹雄, 枝 義弥, 細川俊之: 2014年度日本冷凍空調学会年次大会講演論文集, (2014), C333.

2.1.7 航空・宇宙用材料

航空機分野では2000系, 7000系を中心とした高強度アルミニウム合金が主要構造材として使用されている。新規の材料を航空機に適用するためには、合金のAA (Aluminum Association) 登録, AMS (Aerospace Material Specifications) 規格登録に加え、米国のMMPDS (Metallic Materials Properties Development and Standardization) に登録されることが必要である。本稿執筆時点の最新版であるMMPDS-2023では、高強度化を狙いZn量を増やした7065合金, 7097合金, 7099合金, 7160合金の厚板材やLiを添加した2043合金, 2055合金, 2395合金の押出材が新たに登録されている¹⁾。また、航空機機体への複合材 (CFRP) の適用が進んでおり、依然として航空機製造メーカーにおいて軽量化のニーズがあることが伺える。

上記の通り、航空機機体へのAl-Li合金や複合材などの適用が進んでいるが、これらの先進材料はコストが高いことに加え、耐食性や難加工性の問題など多くの課題が存在する。当社では、2013年度から2022年度に

わたりNEDO革新的新構造材料等研究開発 (ISMA: Innovative Structural Materials Association) に参画し、プロジェクト前半 (2013年度～2018年度) は航空機構造材をターゲットとして高強度・高靱性を有する革新7000系アルミニウム合金の開発を行った。目標値は、現行航空機材として最も多く用いられている7150-T77511材をベンチマークとして25%以上の高強度化を目指し、引張強さ750 MPa以上、耐力700 MPa以上、破断伸び12%以上として、7000系合金及びその製造プロセス技術の開発を進めた。高強度・高靱性の達成のため、主要添加元素 (Zn, Mg, Cu) を固溶限ぎりぎりまで増加させ、MgとCu添加量のバランス最適化を行い、組成をAl-10%Zn-2.5%Mg-1.5%Cu-0.15%Zr (mass%) に設定した。また製造条件を最適化し、繊維状組織を安定化させることにより、温間制御圧延、熱間押出、温間鍛造の各プロセスで引張強さ及び耐力の最終目標値を達成させることができた²⁾。

しかし、厚肉材では素材製造時の残留応力が問題となりやすい。残留応力は、溶体化処理後の焼入れ時に表面と内部の温度勾配によって発生する熱応力が残存するものであり、切削加工時にひずみやねじれの原因となる。特に素材強度が高いほど発生しうる残留応力が高くなるため、高強度合金開発における残留応力測定は非常に重要である。当社では、深穴穿孔法 (Deep Hole Drilling (DHD) 法) による残留応力測定装置を導入し、高精度に内部応力の分布を測定する技術を開発した。DHD法により測定した残留応力と、中性子回折法で測定した残留応力は良く一致していた。中性子回折法は結晶方位の影響を受けることから、特定方位への集積が強い材料では誤差が大きくなる懸念があるが、DHD法はその懸念がないことが利点である。また、深穴穿孔法では表面近傍の残留応力を正確に測定できないため、穿孔法装置を導入し、穿孔法と深孔穿孔法を組み合わせることにより、表層から高深度まで、より正確な残留応力の評価を行える手法を開発した³⁾。

宇宙分野では、ロケット軽量化のため使用されているアルミニウム部品のさらなる加工工程削減へのニーズが近年高まっている。本ニーズをうけ、国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構 (以下「JAXA」) の革新的将来宇宙輸送プログラムの第2回研究提案募集において、三菱重工業株式会社と共同で「WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing, ワイヤー・アーク積層造形) 向け高強度アルミニウム合金ワイヤーの開発」のアイデアを提案し、採択された⁴⁾。この提案は従来アルミニウム板材を加工・溶接して製造していたタンクを、3Dプリンターで製造するというもので、本研究の実現に

より、加工工程を削減することができるほか、自由な形状を作ることが可能となるなど、今後の幅広い展開が期待される。
(新里喜文)

参考文献

- 1) MMPDS-2023 (Metallic Materials Properties Development and Standardization), Battelle Memorial Institute, (2023).
- 2) 森 久史, 箕田 正, 尾村直紀, 戸次洋一郎, 兒島洋一, 渡辺良夫, 田中宏樹: 軽金属, **69** (2019), 9-14. 本誌, **6** (2019), 43-50.
- 3) Satoshi Miyazaki, Hiroki Tanaka, Hisashi Mori: ICAA18 Abstract book (2022), 196.
- 4) <https://www.uacj.co.jp/release/20220810.htm>

2.1.8 新規事業

(1) 背景

不確実性の高い環境下において、企業の持続的な成長や社会への価値創出のためにイノベーションの必要性が指摘されている。しかし、一般的には既存組織からイノベーションを生み出すことが難しいという世界共通の課題がある。それに対して2019年にはイノベーション・マネジメントシステムの国際規格 (ISO56002) が発行された。日本では、同年に経済産業省がISO56002を踏まえて「日本企業における価値創造マネジメントに関する行動指針」¹⁾を公開した。同資料内に示される行動指針の4つ目には、「既存事業の推進と同時に、不確実な未来の中から、事業機会を探索・特定し、短期的には経済合理性が見えなくても、挑戦すべき新規事業に本気で取り組む」という記述があり、先行して取り組んでいる日本企業の事例が掲載されている。

UACJグループでは、2021年に策定した長期経営ビジョン「UACJ VISION 2030」²⁾において、指針の一つとして「新規領域への展開により、社会課題の解決に貢献」を掲げている。企業理念の実現に向けて、既存領域での新たな製品カテゴリ創出や、新規領域での新たな事業・製品の創出に取り組んでいる。

本項では、新規領域の中でも、特にUACJグループにとって新しい市場・顧客への価値創出のために事業開発を実施している事例を新規事業事例として紹介する。

(2) アルミ箔を用いたリアルタイム開封検知サービス「お知らせ箔[®]」³⁾

UACJグループが培ってきたアルミニウム箔へのグラビア印刷技術を活用して、アルミニウム箔上に導電インキを印刷し、電気回路を形成することによりアルミニウム箔包装品の開封を検知する機能を実現した。この技術を医薬品包装用アルミニウム箔に適用して、

近年ニーズが高まっている服薬管理に利用するプロジェクト「開封検知付アルミ箔を使用した服薬管理システム」⁴⁾の開発を2019年から進めている。

この開封検知技術を、開封後の消費期限の管理、配達物の開梱状況の把握、在庫残数の管理など、服薬管理以外の用途へ適用するサービスを「お知らせ箔」と称して新たな事業開発を進めている。お知らせ箔の実用化事例として、医薬品会社が患者説明資材を管理する目的で使用している事例がある。

(3) 折りたたみ可能なアルミニウムパーソナルブース「origami™ +work」⁵⁾

UACJグループが培ってきた折りたたみ可能なアルミ製品製造技術を活用して、折りたたんで手軽に移動・設置できるワークブース「origami+work」を開発し、2022年から販売を開始している。本製品は、数分で設置や折りたたみが可能であり、設置時に施工が要らず、レイアウト変更時には容易に移動させられるという特長を持つ。手軽にパーソナルで快適な空間を用意したい企業の拠点や施設に導入されている⁶⁾。

(4) アルミボトル缶入り備蓄水と供給ネットワークサービス「水の架け橋™」⁷⁾

空気や水蒸気、紫外線を通さないアルミニウムの特長を生かし、賞味期限12年を実現した「アルミボトル缶入り備蓄水」と、災害時の飲料水不足に対して備蓄水購入者同士が支援し合う共助を可能にする「水の架け橋ネットワーク」を提供する事業を2022年に立ち上げた。本製品を導入する事業者や自治体は、買い替え頻度の削減、入替や廃棄作業にかかるコストの削減が見込める。また、アルミ缶はリサイクル率が高いため環境負荷低減や資源循環などの市場ニーズにも対応している。2023年には静岡銀行に採用された⁸⁾。2024年には「第10回ジャパン・レジリエンス・アワード」で優秀賞を受賞した⁹⁾。

(5) 浸水対策用アルミニウム製止水板「水用心®」¹⁰⁾

UACJグループが培ってきた輸送機器用アルミニウム押出材の設計・製造技術を活用して、水害時に建物内への浸水を防ぐ止水板「水用心」を開発し、2022年から販売を開始した。従来の一般的な浸水対策用品である土のうに対して、止水板は止水性が高く設置及び撤去が簡単である。「水用心」は、自社の製造ラインや技術を活用することで、より安価で簡単に設置できる特長がある。止水板を必要とする顧客に届けるためのバリューチェーン構築も含めた事業開発に取り組んでい

る。自社だけでは解決が困難な課題に対しては、他社と共創するオープンイノベーションにも挑戦している。2022年に愛知県が主催する共創プログラム“Aichi Smart Sustainable City Co-Creation Challenge”¹¹⁾に参加し、マッチングしたスタートアップ企業との実証実験を進めている¹²⁾。

(6) アルミホイルを接点とした消費者との共創¹³⁾

UACJグループが取り扱う製品の中で、もっとも直接的に消費者に提供される製品が家庭用アルミホイルである。そこで、消費者との新たなコミュニケーションとビジネス機会の探索を目的に、アルミホイルの価値や可能性を消費者が体感できるようなイベント出展活動を実施した。主に防災系の展示会にて、マイホイルPLUS™のパッケージで紹介されている災害時のアルミホイル活用方法の一部を模擬体験できる体験ブースを展示した。

また、2024年には、この活動から得た消費者からの反応や気づきを元にアルミホイルを活用したワークショップ・ツール「ワークショップの素™」を開発し、トライアル販売を開始した¹⁴⁾。本事業は、企業の研修や新製品開発に携わる職場、教育現場、介護施設など、コミュニケーション活性化やチームビルディングが求められるチーム・組織に貢献することを目指している。

(7) 今後の展望

今後は、これまで立ち上げてきた新規事業案件の適切な推進に加えて、UACJグループのコア技術を活用した新規事業の創出に取り組む。また、戦略的かつ継続的な新規事業創出のためのマネジメント体制の構築も進める。

(黒崎友仁)

参考文献

- 1) https://www.meti.go.jp/policy/economy/keiei_innovation/kodoshishin/pdf/20191004003-1.pdf
- 2) https://www.uacj.co.jp/ir/policy/long_term_vision.htm
- 3) 小石川敦史：本誌，**9** (2022)，60。
- 4) <https://www.uacj.co.jp/release/20191115.htm>
- 5) 権藤隆範，田垣内孝夫：本誌，**10** (2023)，162-165。
- 6) <https://www.uacj.co.jp/release/20240325.htm>
- 7) <https://www.uacj.co.jp/release/20220721.htm>
- 8) <https://www.uacj.co.jp/release/20230420.htm>
- 9) <https://www.uacj.co.jp/release/20240424.htm>
- 10) 黒崎友仁，高橋昌也：本誌，**10** (2023)，158-161。
- 11) 黒崎友仁，大谷良行，渡邊貴道：本誌，**10** (2023)，174-175。
- 12) <https://www.uacj.co.jp/release/20230619.htm>
- 13) 竹村沙友理，渡邊貴道，黒崎友仁，荒木俊雄，加藤勝也：本誌，**10** (2023)，168-170。
- 14) <https://www.uacj.co.jp/release/20240528.htm>

2.2 要素技術

2.2.1 組織制御

当社において、組織制御は製品の材料特性・品質をコントロールするテクノロジーの根幹であり、重要な研究分野と位置付け、その成果を積極的に学会発表してきた。2013～2023年に軽金属学会誌に掲載された論文・解説の内、当社の研究員が第一著者又は共著者となっている案件は68件で、その内容が組織制御に関するものは40件と多い。ここで紹介する当社における研究事例の大半は、缶材や自動車材などの当社の主要製品を対象として、その特性向上や、品質の安定化を目的として行われている。ここでは、組織制御をいくつかに分類して、当社独自で、又は大学等と共同で行った研究実績を中心に紹介する。

加工後の焼鈍時などにおいて原子の再配列が生じて材料の軟化が生じる「回復・再結晶」は、材料の強度や延性などに影響する重要な組織変化現象である。1000系アルミニウムの回復・再結晶と延性の関係¹⁾や不純物元素の影響²⁾、Al-Fe合金に及ぼす不純物Siの影響³⁾、Al-Mn合金について熱間加工後の再結晶挙動^{4),5)}、熱交換器用の3003合金について再結晶に及ぼすSi濃度の影響⁶⁾、自動車ボディシート等に用いられるAl-Mg-Si合金の再結晶に及ぼすSi濃度の影響⁷⁾やMn・Zr添加の影響⁸⁾、缶用3104合金の回復に及ぼす固溶元素の影響⁹⁾、7000系合金の回復・再結晶に及ぼす熱間加工条件の影響¹⁰⁾など幅広い製品・合金種について研究がなされた。

再結晶後などに形成される結晶粒方位分布の集積度を意味する「集合組織」は材料の加工性などに大きく影響する重要な組織制御の対象である。7000系合金の押出材¹¹⁾や6000系合金の押出材(特に溶着部の影響)¹²⁾の他、自動車ボディシート用6000系合金¹³⁾、缶用の3104合金¹⁴⁾について、研究が行われ、各製品の加工性改善等に繋がられた。

アルミニウム合金製品について行われる加工の内、曲げ加工は最も一般的な加工方法の一つであるが、特に曲げ加工部の外表面において大きな加工歪みが生じて割れが生じやすいために「曲げ加工性」に関する組織制御の研究は、以前から盛んに行われてきた。当社でも自動車ボディシート用6000系合金においてマイクロボイドの影響¹⁵⁾、時効析出物の影響¹⁶⁾が研究され、また自動車バンパー用7000系合金押出材について初期組織の影響¹⁷⁾が研究された。

アルミニウム合金の使用温度が従来よりも高くなり、それに伴い、高温での荷重負荷時に生じる歪み(クリープ変形)の低減が求められることが増加している。これ

に対して、6000系合金¹⁸⁾や3000系合金¹⁹⁾について、組織制御の観点からクリープ特性に関する基礎的研究が行われた。

時効硬化型のアルミニウム合金では、溶体化処理後の急冷によって、添加元素を室温で過飽和固溶させた後に、人工時効処理等により微細析出させることで、高強度を得ることができる。さらなる高強度化を背景として、この「時効析出」も組織制御における主要な研究テーマであり続けている。7000系合金については、高強度・高靱性化を目指して研究開発が行われる²⁰⁾と共に、焼入れ速度とその後の人工時効の関係^{21),22)}、Sc・Zr共添加の効果²³⁾、二段時効時の析出の速度論²⁴⁾についても研究された。また、2000系合金についても同様に、焼入れ速度と人工時効の関係が研究された²⁵⁾。また、自動車ボディシート用6000系合金についてはクラスタの形成挙動²⁶⁾と、その原子構造解析²⁷⁾が進められた。尚、代表的な時効硬化型合金として超々ジュラルミンなどについて戦前からの開発史²⁸⁾がまとめられているので興味のある方は参照されたい。

近年における、マイクロ組織の解析技術や装置の顕著な進歩は、組織制御の研究においても、非常に大きく貢献した。特にSPRING-8に代表される大型放射光施設における高輝度X線利用は、ナノ・マイクロレベルでの組織解析・解明に大きく寄与した。アルミニウム合金についての研究事例として、マイクロボイドなどの微細欠陥の可視化²⁹⁾、6000系合金のX線吸収微細構造(XAFS)解析³⁰⁾、転位密度測定³¹⁾があった。

上記に加えて、昨今の社会・産業情勢を反映したものとして、DX化に伴うマテリアルズインフォマティクスによる新規のアルミニウム合金開発の取組み³²⁾や、カーボンニュートラル社会の実現に向けて、リサイクル合金の活用を目指して、大歪み加工の利用に関する研究³³⁾が精力的に進められた。

(一谷幸司)

参考文献

- 1) 浅野峰生, 中村拓郎, 吉田英雄: 軽金属, **64** (2014), 279-284. 本誌, **1** (2014), 30-36.
- 2) 吉田英雄, 大久保喜正: 軽金属, **64** (2014), 285-291. 本誌, **1** (2014), 45-54.
- 3) 原 聡宏, 江草大佑, 三原麻未, 田中宏樹, 大沼郁雄, 阿部英司: 日本金属学会誌, **84** (2020), 406-412. 本誌, **8** (2021), 2-9.
- 4) 田中宏樹, 成田 渉: 軽金属, **69** (2019), 393-397. 本誌, **7** (2020), 11-16.
- 5) 田中宏樹, 佐々木勝寛, 立山真司: 軽金属, **71** (2021), 549-554. 本誌, **9** (2022), 10-36.
- 6) 安藤 誠, 福元敦志, 田中宏和: 軽金属, **66** (2016), 180-184. 本誌, **3** (2016), 19-24.
- 7) 長谷川啓史, 中西英貴, 浅野峰生: 軽金属, **66** (2016), 298-

305. 本誌, **3** (2016), 2-10.
- 8) 田中宏樹, 長井康礼: 軽金属, **66** (2016), 2-8. 本誌, **3** (2016), 11-18.
- 9) 工藤智行, 吉田英雄, 田中宏樹: 軽金属, **72** (2022), 585-592. 本誌, **10** (2023), 75-84.
- 10) 則包一成, 藤森崇起, 田中宏樹: 軽金属, **69** (2019), 36-41. 本誌, **6** (2019), 25-32.
- 11) 新里喜文, 箕田 正, 吉田英雄: 軽金属, **63** (2013), 218-222.
- 12) 安田晋也, 熱田 賢, 若栗聡史, 一谷幸司, 日比野旭: 軽金属, **64** (2014), 191-194. 本誌, **1** (2014), 2-7.
- 13) 日比野旭, 黒崎友仁: 軽金属, **68** (2018), 555-557. 本誌, **6** (2019), 21-24.
- 14) 小林亮平, 工藤智行, 田中宏樹: 軽金属, **69** (2019), 387-392. 本誌, **7** (2020), 17-23.
- 15) 山本裕介, 浅野峰生, 吉田英雄, 小林正和, 戸田裕之: 軽金属, **63** (2013), 452-457. 本誌, **1** (2014), 55-62.
- 16) 中西英貴, 浅野峰生, 吉田英雄: 軽金属, **64** (2014), 235-240. 本誌, **1** (2014), 23-29.
- 17) アマリナ アイナ カハルディン, 佐伯 蘭, 高谷 舞, 箕田 正, 本間智之: 軽金属, **73** (2023), 382-388. 本誌, **11** (2024), 掲載予定
- 18) 安藤 誠, 新倉昭男, 鈴木義和, 伊藤吾朗: 軽金属, **64** (2014), 229-234. 本誌, **1** (2014), 69-75.
- 19) 安藤 誠, 新倉昭男, 鈴木義和, 伊藤吾朗: 軽金属, **64** (2014), 451-456. 本誌, **2** (2015), 66-72.
- 20) 森 久史, 箕田 正, 尾村直紀, 戸次洋一郎, 兒島洋一, 渡辺良夫, 田中宏樹: 軽金属, **69** (2019), 9-14. 本誌, **6** (2019), 43-50.
- 21) 吉田英雄, 渡辺威郎, 八太秀周: 軽金属, **67** (2017), 41-48. 本誌, **4** (2017), 35-44.
- 22) 愛須優輝, 一谷幸司, 田中宏樹, 齊藤元貴, 武藤俊介, 岡島敏浩: 軽金属, **73** (2023), 616-621.
- 23) 高谷 舞, 一谷幸司, 箕田 正: 軽金属, **73** (2023), 328-331. 本誌, **11** (2024), 掲載予定
- 24) 吉田英雄, 成田麻未, 田中宏樹: 軽金属, **74** (2024), 188-197.
- 25) 鈴木太一, 八太秀周, 吉田英雄: 軽金属, **68** (2018), 333-338. 本誌, **5** (2018), 55-63.
- 26) 澤 裕也, 一谷幸司, 日比野旭: 軽金属, **65** (2015), 229-233. 本誌, **2** (2015), 73-79.
- 27) 木下亮平, 江草大祐, 佐々木泰祐, 宝野和博, 立山真司, 箕田 正, 田中宏樹, 阿部英司: 軽金属学会 第138回春期大会講演概要, (2020), 319-320.
- 28) 吉田英雄: 軽金属, **65** (2015), 432-440. ※連載の続編もあり 本誌, **3** (2016), 57-73, **4** (2017), 101-122, **5** (2018), 92-121, **6** (2019), 67-80.
- 29) 戸田裕之, 小林正和, 久保貴司, 茂泉 健, 杉山大吾, 山本裕介, 原田俊宏, 林 憲司, 半谷慎彦, 村上雄一郎: 軽金属, **63** (2013), 343-349.
- 30) 足立大樹, 中西英貴, 浅野峰生: 軽金属, **65** (2015), 411-415. 本誌, **8** (2021), 10-15.
- 31) 足立大樹, 溝脇大史, 平田雅裕, 岡井大祐, 中西英貴: 軽金属, **70** (2020), 274-280. 本誌, **9** (2022), 2-9.
- 32) 愛須優輝, 高谷 舞, 岩村信吾, 一谷幸司, 山本祐樹, 箕田 正, 永田賢二, 井上純哉, 榎 学: 軽金属学会 第145回秋期大会講演概要, (2023), 199-200.
- 33) 原 聡宏, 一谷幸司, 戸次洋一郎, 軽金属学会 第146回春期大会講演概要, (2024), 207-208.

2.2.2 塑性加工

アルミニウム合金板を製品に適用する際, その多く

は, 板材から目的の製品形状へ成形することが必要となる。板材の代表的な成形技術としては, 金型を用いたプレス成形技術が挙げられる。20～30年前まで, プレス成形で使用する金型は, 熟練者の知識や経験を基に設計され, 実プレスのトライ&エラーにより仕上げを行うことが多かったため, 金型設計期間の長時間化が課題とされてきた。本課題を解決するためには, プレス成形シミュレーション技術の開発が必要であり, 当社でもこれまで多くの取組みを行ってきた。ここ10年は, 成形シミュレーションの高精度化を目的としたひずみのin-situ測定や高精度な材料パラメータの取得, これらのデータを用いた材料モデルの開発などを進めてきた。また, 成形性に優れた新たな合金板の開発と並行して, 自動車ボディパネルに適用可能なリサイクル合金板の開発も進めた。

(1) 成形シミュレーションの高精度化

a) ひずみのin-situ測定

デジタル画像相関法(DIC: Digital Image Correlation)の発達により, 成形中の板材のひずみ分布変化を可視化することが可能となってきた。そこで, プレス成形の代表的な変形様式の一つである伸びフランジ性に関して, 割れ発生メカニズムの解明を目的とした穴広げ試験中のひずみ分布変化を測定し, 穴縁部の円周方向のひずみが単軸引張の破断ひずみに達した部分で割れが発生することを明らかにした¹⁾。現在もDIC装置の測定精度は向上し続けており, 今後も破壊メカニズムの解明や成形シミュレーションの高精度化に向けた取組みに利用していく。

b) 高精度な材料パラメータの取得

十字引張試験及び二軸バルジ試験を利用した高ひずみ域までの等塑性仕事面を測定し, 液圧バルジ成形や穴広げ成形における成形シミュレーションの高精度化を進めた^{2)~9)}。

c) 材料モデルの開発

6000系合金板の異方硬化モデルに関する研究を進め¹⁰⁾, 引張性質の面内異方性はO調質とT4調質で異なり, 自然時効, すなわちクラスタの形成により異方硬化が発現することを明らかにした。しかし, 本現象を表現するための材料モデルの構築は難易度が高く, 異方硬化のメカニズム解明を含め, 今後の課題となっている。

(2) アルミニウム合金板の成形性向上

a) リサイクル合金板

自動車ボディパネル用リサイクル合金板として, ア

ルミニウム合金板の製造工程で発生する端材を約 50% 配合した「低CO₂リサイクルアルミ材」を開発した¹¹⁾。本板材は、従来活用できなかったクラッド材などの製造工程端材を使用した合金である。そのため、不純物元素が増加し、成形性や耐食性などの低下が課題とされた。これらの課題に対して、材料の開発ステージから自動車メーカーと協業を行い、実用化に向けた取り組みを行った。成形性に関しては、部品形状を最適化することによりプレス成形を可能とし、MIRAI フードインナへの採用が実現した。本開発合金は、MIRAI 以降の新規車種への適用も検討されており、今後の適用拡大が期待される。

b) 熱間ブロー成形用合金板

高成形性を有する熱間ブロー成形用 5000 系合金板として「ALNOVI®-U」を新たに開発した¹²⁾。熱間ブロー成形は、高温域においてアルミニウム合金が極めて大きな延性を示すことを利用した成形方法であり、難加工部品を一体で成形することが可能である^{13),14)}。「ALNOVI-U」は、従来の熱間ブロー成形用 5000 系合金である「ALNOVI-1」よりも高い成形速度域での成形が可能な合金である。具体的にはひずみ速度を 2～3 倍としても、従来材と同等の伸びが得られるため、成形時間を 1/2～1/3 に短縮することが可能となった。海外の自動車・鉄道・バスなどの輸送機部品に採用されており、今後も輸送機器を中心とした幅広い分野への適用が期待される。(中西英貴)

参考文献

- 1) 飯塚悠貴, 桑原利彦, 速水宏晃: 軽金属, **72** (2022), 702-707. 本誌, **10** (2023), 100-106.
- 2) 森 崇裕, 川口順平, 浅野峰生, 上間直幸, 桑原利彦: 軽金属学会 第 126 回春期講演概要, (2014), 41-42.
- 3) 森 崇裕, 川口順平, 浅野峰生, 上間直幸, 桑原利彦: 平成 26 年度塑性加工春季講演会講演論文集, (2014), 323-324.
- 4) 森 崇裕, 浅野峰生, 上野洋一, 上間直幸, 桑原利彦: 軽金属学会 第 128 回春期講演概要, (2015), 39-40.
- 5) T. Kuwabara, T. Mori, M. Asano, T. Hakoyama and F. Barlat: International Journal of Plasticity, **93** (2017), 164-186.
- 6) 小笠原柚, 桑原利彦, 竹田博貴: 軽金属学会 第 135 回秋期講演概要, (2018), 177-178.
- 7) 小笠原柚, 桑原利彦, 箱山智之, 竹田博貴, 池田剛司: 軽金属学会 第 136 回春期講演概要, (2019), 281-282.
- 8) 小笠原柚, 桑原利彦, 竹田博貴, 池田剛司: 2019 年度塑性加工春季講演会論文集, (2019), 236-237.
- 9) 小笠原柚, 桑原利彦, 箱山智之, 速水宏晃, 竹田博貴, 池田剛司: 軽金属学会 第 137 回秋期講演概要, (2019), 127-128.
- 10) K. Yoshida, Y. Yamazaki and H. Nakanishi: Metals, **11** (2021), 1979.
- 11) 西川直樹, 増田勇也, 大竹和実, 蔵本 遼, 山崎裕貴, 永井健史: TOYOTA Technical Review, **66** (2021), 92-95. 本誌, **8** (2021), 62-65.
- 12) 工藤智行: 本誌, **1** (2014), 131-133.

- 13) 劉 午陽: ぶらすとす, **5** (2022), 126-130. 本誌, **10** (2023), 144-149.
- 14) 新里喜文, 浅野峰生: プレス技術 **54-12** (2016), 52-55. 本誌, **5** (2018), 64-68.

2.2.3 表面改質 (接着のための表面改質含む)

アルミニウムは表面改質技術によって多様な機能性を付与することが可能であり、顧客ニーズや社会課題の解決に資する様々なニーズ及びシーズ技術を開発した。また、アルミニウムへの理解をさらに深め、使いこなしていくために、各種現象のメカニズム解明にも積極的に取り組んだ。

アノード酸化 (アルマイト) は、処理条件の工夫によって酸化皮膜の微細構造を制御し、ユニークな特性を発現させることが可能であり、これを応用し様々なシーズ技術を開発した。高意匠性表面として、凹凸構造をもつ樹枝状皮膜を形成することで光の乱反射を誘起し、染料や顔料を用いずに L* 値 87 を超える白色アルマイト皮膜を開発した¹⁾。機能性表面処理として、加温したシュウ酸浴を用いることで、汎用の直流電解で高密着性表面を実現した²⁾。新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託業務では、二段階アノード酸化により形成したリエントラント (蛸壺状) 構造皮膜が沸騰伝熱効率を促進することを見出した³⁾。K O 処理[®] はアルミニウムと樹脂との密着性を向上させる表面処理であり、主にプリント配線基板用材料として長年の実績がある。K O 処理はアルカリ性電解液中での交流電解処理で製造され、以前は製品サイズの板材へのバッチ処理であったものを、新たにコイル K O 処理を実用化し、広幅の長尺品や薄板品の製造を可能とした⁴⁾。

コイルに連続的に下地処理と焼付塗装を行ったプレコート材 (成形加工前に塗装される製品) では、添加材の工夫などの独自の塗膜設計により、様々なニーズに対応してきた。排ガスや雨筋によって建材や車両に発生する汚れに対して、防汚性と、素材としての使いやすさとして曲げ加工性を両立した製品を開発した⁵⁾。近年、電子機器は小型化・高性能化に伴う発熱対策が重要な課題となっていることから、赤外放射率を高めた塗膜により放熱性を向上させ⁶⁾、さらに厳しい使用環境に対応するため耐高湿性を向上させた製品を開発した⁷⁾。

近年は、軽量化・低コスト化を目的として導電部材へのアルミニウム材の適用が増加しているが、使用環境によっては表面の酸化皮膜が成長し接触抵抗が増大する。これを防止するための新規化成処理技術を開発した⁸⁾。

アルミニウムは耐食性に優れる材料であるが、環境によっては腐食することがあるため、腐食挙動を材料と環境の両面から調べそのメカニズムを理解することは、アルミニウムを使いこなしていく上で極めて重要である。材料側の影響として、ケイ素が粒界腐食性に及ぼす影響を系統的に調べた⁹⁾。将来のマルチマテリアル車体などを想定し、アルミニウムと亜鉛めっき銅板との合わせ面の腐食挙動を調査し¹⁰⁾、さらにNEDO委託業務の一環として、融雪塩散布地域との相関性が高い腐食試験法の開発及び腐食メカニズム解明に取り組んだ¹¹⁾。環境面では、大気腐食環境を模擬した定露点サイクルにおいて付着塩種が及ぼす影響¹²⁾、硫酸イオン及び亜硫酸イオンと塩化物イオンが共存した場合の影響¹³⁾、各種条件が糸錆に及ぼす影響¹⁴⁾などを解明した。評価技術として、アルミニウムの重要な電気化学特性である孔食電位をより簡便な自然電位測定から求める手法の標準化に当社をはじめとしたアルミニウム業界で取り組み、国際標準化(ISO3079: 2022)に至った¹⁵⁾。

マルチマテリアル車体に関わる課題である異材接合に関してもNEDO委託業務として取り組み、アルミニウムとCFRP(炭素繊維強化プラスチック)等との点接合技術の開発及びアルミニウム表面性状の最適化、並びに異材接合部の劣化挙動評価技術の開発を行った^{16), 17)}。

易酸化元素であるマグネシウムを含有するアルミニウム合金は、製造工程における入熱で表面にマグネシウム酸化物を含む皮膜が生成し、表面特性に影響を与えることから、その生成過程を詳細に解明し¹⁸⁾、また接着性に及ぼす影響について調査した¹⁹⁾。

現在、日本で発生するアルミニウムのスクラップの多くは、輸送機器用の鋳物材としてカスケード(アルミニウム純度の低下を伴う)リサイクルされている。今後、輸送機器のEV化で世界的に鋳物材需要の減少も予想されるなか、循環型社会の実現に向けて、他元素を多く含むスクラップから高純度アルミニウムを回収する技術の開発が求められる。この課題に対し、電気化学的手法を応用した省エネ型プロセスとして、 AlCl_3 系浴を用いた低温型電解法の研究開発にNEDO委託業務の一環として産学協業で取り組んでいる^{20), 21)}。

(京 良彦)

参考文献

- 1) 布村順司, 児島洋一: 本誌, **6** (2019), 90-94.
- 2) D. Nakajima, S. Saito, Y. Oya and S. Suzuki: Electrochemical Society Meeting Abstracts PRiME2020,

- (2020), 1237-1237.
- 3) 中島大希, 戸次洋一郎, 黒谷昇平, 森 昌司, 高田保之, Shen Biao: 表面技術協会 第148回公演大会, (2023), 31-32.
- 4) 三村達矢: 本誌, **3** (2016), 116-118.
- 5) 小澤武廣, 前園利樹, 小材仁志: 本誌, **3** (2016), 119-120.
- 6) 小澤武廣, 小材仁志: 特許第6619920号, (2019).
- 7) 渡邊博紀, 加藤 治: 特開2023-74091, (2023).
- 8) 千村勇祐, 島田隆登志, 安田和史, 上坂元秀彰: 特許第7073257号, (2022).
- 9) Y. Oya and Y. Kojima: 本誌, **1** (2014), 8-16.
- 10) 村田拓哉, 大谷良行: 本誌, **8** (2021), 75-78.
- 11) 初井隆宏, 村田拓哉, 京 良彦, 梅田真裕, 小崎 匠: 第69回材料と環境討論会, (2022), A-104.
- 12) 島田隆登志, 大谷良行, 本川幸翁, 児島洋一: 本誌, **1** (2014), 17-22.
- 13) 大谷良行, 本川幸翁, 児島洋一: 本誌, **2** (2015), 2-9.
- 14) 三村達矢, 小林敏明, 島田隆登志, 大谷良行, 小山高弘, 児島洋一: 軽金属学会 第127回秋期大会講演概要, (2014), 97-98.
- 15) 大谷良行: 本誌, **8** (2021), 79-80.
- 16) 日経ものづくり, 日経BP, 2019年12月号, 55-57.
- 17) 革新的新構造材料等研究開発 2021年度成果報告会ポスター集, (2022), 40-41.
- 18) 吉田大輝, 本多 理, 京 良彦, 箕田 正: 軽金属学会 第144回春期大会講演概要, (2023), 147-148.
- 19) 斉藤聡平, 中島大希: 軽金属学会 第145回秋期大会講演概要, (2023), 237-238.
- 20) 児島洋一, 布村順司, 上田幹人, 宇井幸一, 津田哲哉, 三宅正男: 革新構造材料とマルチマテリアル 輸送用機器の軽量化のための材料・接合・設計技術-下巻 プロジェクト成果総覧, オーム社, (2023), 304-308.
- 21) <https://www.uacj.co.jp/release/20240823.htm>

2.2.4 分析

(1) 表面分析

アルミニウムの製品開発や品質調査では、迅速で正確な表面の観察や元素分析が求められるため、電子線やX線を用いた表面分析技術の活用と改良を進めてきた。

走査電子顕微鏡(Scanning Electron Microscope: SEM)は低加速電圧化と元素分析検出器の進展に伴い、より最表面観察が容易となり、表面欠陥や化成処理状態などの詳細解明に寄与してきた。元素分析では高感度検出や、高立体角型の検出器などを導入し、低加速電圧と組み合わせることで表層数百nmの表面状態がより正確に分析可能となった^{1), 2)}。さらに蛍光X線(X-ray Fluorescence: XRF)分析やグロー放電発光分光分析(Glow Discharge Optical Emission Spectroscopy: GDOES)と組み合わせることで、化成処理皮膜の詳細な解析を行ってきた³⁾。

電子プローブマイクロアナライザー(Electron Probe Micro Analyzer: EPMA)は、より正確な元素分析装置として活用されている。分光器の安定度の検証やX線強度のモニタリング、最適な分光結晶と波長の選択等を行うことにより、より迅速で正確な分析を可

能とした^{4),5)}。

アルミニウム合金中には添加元素による金属間化合物が存在しており、その化合物とアルミニウム母材との間には界面電位差が存在し、耐食性などに影響が生じると考えられている。母材と金属間化合物間の電位差を測定するため、ケルビンプローブフォース顕微鏡 (Kelvin probe Force Microscope: KFM) 法を用いた分析手法^{6),7)}や透過電子顕微鏡 (Transmission Electron Microscope: TEM) を用いた影像歪法^{8)~15)}による分析手法を開発した。一般的にTEM中での電位の定量測定には電子線ホログラフィー法が用いられるが、特殊な装置を必要とし、観察領域の制限などに課題がある。これに対し、影像歪法では従来型TEMを用いて電場・磁場の分布を簡便に測定できる。またTEMにおいては試料作製方法を工夫することで高真空中での液相状態の観察を可能とし、加熱ホルダーと組み合わせることで金属間化合物の溶融凝固過程のその場観察が可能な分析手法を開発した¹⁶⁾。

(2) 有機分析

アルミニウム製品では有機物の分析需要は年々高まっている。アルミニウム缶やエアコンフィン材の塗膜、製造時に使用する各種油、製品表面に付着した有機系異物など多岐に渡る有機物が分析対象となる。各種クロマトグラフやフーリエ変換赤外分光光度計、熱分析装置など各種装置の進化に伴い、分析時間が短縮されデータ処理性が向上してきた。劣化物や未知試料に対してはガスクロマトグラフ質量分析計を活用し、より詳細な分析を行っている。分析装置の進化により分析技術が高度化されてきたが、各種有機物に応じて前処理方法やカラムの種類等の選択を適切に行うことが重要であり、正確な分析のため各種前処理条件も最適化してきた。また、有機無機複合領域において表面分析と連携し、接着接合などのメカニズムの解明を進めてきた¹⁷⁾。

(3) 湿式分析

アルミニウム合金中の金属元素を高精度に定量する手法として、湿式分析はアルミニウム製品の根幹を支える重要な分析技術である。化学的な前処理による定量分析方法としては、重量法、吸光光度法、高周波誘導結合プラズマ発光分光分析法 (Inductively coupled plasma optical emission spectroscopy: ICP-OES)、原子吸光分析法 (Atomic Absorption Spectroscopy: AAS) などがあり、試料採取や前処理技術も含めた内容についてまとめ、公表した¹⁸⁾。

アルミニウム合金中の水素分析に関し、軽金属学会の研究部会として、各分析機関による水素量測定のパラレルテストを実施した^{19)~22)}。いずれの装置でもばらつきにくく、かつ機関間の差が生じにくい前処理法を明らかにする目的で種々の影響を調査した結果、前処理や表面由来の吸着水素が分析値差に影響していることが示唆された。また日本アルミニウム協会の分析委員会に参画し、アルミニウムの分析方法に関するJIS制定・見直しに関する活動を推進している。

(斉藤聡平)

参考文献

- 1) 富野麻衣, 倉内武類, 佐々木勝寛, 大谷良行: 軽金属学会 東海支部ポスター講演会概要集, (2019), P04.
- 2) 大澤伸夫, 富野麻衣, 林 知宏, 上田 薫, 本居哲也: 表面技術, **73** (2022), 504-511. 本誌, **10** (2023), 107-116.
- 3) 野瀬健二, 渡壁尚仁, 大澤伸夫: 軽金属学会 第128回春期大会講演概要, (2015), 129-130.
- 4) 富野麻衣: 日本電子株式会社「EPMA・表面分析Users Meeting」(2016).
- 5) 富野麻衣: 軽金属学会 第135回秋期大会講演概要, (2018), 223-224.
- 6) 仲田 都, 佐々木勝寛: 軽金属学会東海支部ポスター講演会概要集, (2019), P03.
- 7) 仲田 都, 佐々木勝寛, 京 良彦, 大谷良行: 2019年日本表面真空学会学術講演会要旨集, (2019), 3Gp06.
- 8) 佐々木勝寛, 佐々木宏和, 五十嵐信行, 丹司敬義: 日本金属学会2018年度春期(第162回)講演大会概要集, (2018), No. 128.
- 9) 佐々木勝寛, 佐々木宏和, 富野麻衣, 大谷良行: 日本金属学会2018年度秋期(第163回)講演大会概要集, (2018), No. 233.
- 10) 佐々木勝寛, 京 良彦, 富野麻衣, 大谷良行, 佐々木宏和: 軽金属学会 第135回秋期大会講演概要, (2018), 255-260.
- 11) 佐々木勝寛, 佐々木宏和, 山本雄太, 仲田 都, 富野麻衣: 日本顕微鏡学会第75回学術講演会, (2019), 2pmG_I4-13, 104.
- 12) 佐々木勝寛, 仲田 都, 佐々木宏和: 軽金属学会 第137回秋期大会講演概要, (2019), 203-204.
- 13) 佐々木勝寛, 仲田 都, 佐々木宏和: 日本金属学会2019年度秋期(第165回)講演大会概要集, (2019), No. 1042.
- 14) K. Sasaki, H. Sasaki and S. Saito: Microsc. Microanal., **24** (2018), 26-27.
- 15) K. Sasaki, H. Sasaki, Y. Yamamoto and Y. Oya: Microsc. Microanal., **25** (2019), 106-107.
- 16) 佐々木勝寛, 山吉知樹, 小俣香織, 南部智恵: 日本金属学会 2022年度秋期(第171回)講演大会概要集, (2022), No. 43.
- 17) 斉藤聡平, 中島大希: 軽金属学会 第145回秋期大会講演概要, (2023), 237-238.
- 18) 清水ゆかり: 軽金属溶接, **61** (2023), 188-194.
- 19) 清水ゆかり: 軽金属学会 127回秋期大会講演概要, (2014), 265-226.
- 20) 清水ゆかり: 軽金属学会 127回秋期大会講演概要, (2014), 279-280.
- 21) 清水ゆかり: 軽金属, **66** (2016), 58-62.
- 22) 清水ゆかり: 軽金属学会 研究部会報告書 No. 60, (2015), 4-14.

2.2.5 接合

近年、地球環境保護とエネルギー危機の観点から輸送機器の軽量化が重要になっており、例えば自動車ではボディや部品へのアルミニウム合金の適用が盛んである。これらの製品には種々の加工が施されているが、その中でも製品組立技術としての接合は用途を広げるために重要と位置付け、積極的に開発を進めてきた。

(1) ミグ溶接のアルミニウム部材への適用

2015年5月に販売を開始した「マツダロードスター」では、(株)UACJ金属加工が製造するアルミニウム合金製軽量バンパーアセンブリーが採用された。レインフォースメントとクラッシュカンをミグ溶接により強固に組み立てて一体品とするなど、各部位毎に材料及び工法の最適化を図ることにより、従来比で約32%の大幅な軽量化を達成した¹⁾。また、バンパーレインフォースの下部に設置される、いわゆる第二バンパーレインフォースと称される製品はUACJ Automotive Whitehall Industries Inc.にて量産を開始した。本バンパーアセンブリー製品もミグ溶接により一体品としている²⁾。

(2) レーザ溶接の研究

エネルギー密度の高いレーザ溶接の分野では、2000年頃から電気から光へのエネルギー変換効率の高いレーザ発振器が登場した。それまでのランプ励起Nd:YAGレーザのエネルギー変換効率が3%程度であったのに対し、例えばファイバーレーザは30%、ディスクレーザは25%、半導体レーザは40%といわれ、レーザ溶接の実用化がより現実的なものとなった。当社でもこれを契機に高出力レーザ試験機の導入を進めた。レーザ溶接を活用した研究例として、鉄を添加したアルミニウム合金における溶接部の硬さと組織の関係がある。溶接速度の増大やレーザ出力の低減による入熱量の低下に伴って、溶接金属の硬さが上昇することを明らかにした。低入熱条件では冷却速度が大きくなり、金属間化合物が微細化するためと考察している^{3), 4)}。Al-Mg系合金では、鉄の添加によりレーザ溶接における凝固割れ感受性が低下した。固液共存温度幅や金属組織の変化が影響したと考察している⁵⁾。このような割れの低減には、レーザ照射条件の調整による低入熱化が有効と考えられ、重ね隅肉継手における割れ低減方法を提案した^{6), 7)}。レーザの応用については、溶接にとどまらず熱処理や穴あけなど広範囲に亘って技術開発を進めている。

(3) 摩擦かくはん接合の適用拡大

摩擦かくはん接合 (Friction Stir Welding, FSW) は、母材を溶かさず固相接合法であり、割れ感受性が高く溶融溶接が困難とされてきたAl-Mg-Si系合金やAl-Zn-Mg-Cu系合金などへの適用検討を進めてきた。その用途は鉄道車両から始まり、船舶や土木建築、自動車ボディパネルに至る。

異材接合では、2017-T4と樹脂材料との重ね継手特性に及ぼすアルマイト皮膜の影響を研究した。極性官能基のカルボキシル基 (-COOH) を有するエチレン・アクリル酸コポリマー (EAA) との接合では、極性官能基と自然酸化皮膜との水素結合力により、アルマイト皮膜の有無に関わらず引張せん断試験の際に樹脂部で破断を示す良好な継手が得られた。一方、極性官能基を持たない高密度ポリエチレン (PE) との接合では、アルマイト皮膜がある場合のみ良好な接手が得られ、その原因がアルマイト皮膜孔内に嵌入した樹脂によるアンカー効果であることを推定した⁸⁾。

ツールに関しては接合部の品質や生産性の改善に向けて、以下に示すいくつかの新技术を開発した。

- 溶加材を供給することで接合部に任意形状の肉盛りを形成する固定ショルダ式ツール⁹⁾
- 摩擦かくはん点接合で用いる複動式ツールにおいて、材料のツールへの凝着を防止して動作不良を抑制し、安定した接合強度及び破断形態が得られるツール¹⁰⁾
- 板厚が異なるテーラードブランク材の接合が容易であり、接合時のバリを抑制できるツール¹¹⁾

(4) 爆発圧着法の研究

爆発圧着法は、異種金属接合の際、接合界面に形成される金属間化合物層の厚みを薄くできる接合方法である。6005C-T5とAZ31の爆発圧着クラッド材では接合界面が波状形状になり、部分的に溶融した金属組織が形成されることを明らかにした。また、接合界面には厚さ1 μm 以下の中間層が認められ、中間層は結晶質組織 ($\gamma\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 相) と非晶質組織の混在組織であることを確認した¹²⁾。6005C-T5と難燃性マグネシウム合金の爆発圧着クラッド材においては、焼鈍温度及び焼鈍時間の増加に伴って接合界面に形成された金属間化合物層の厚みが増加し、界面せん断強度が低下することを明らかにした^{13), 14)}。また、焼鈍温度が473 Kで薄い単層の $\beta\text{-Mg}_2\text{Al}_3$ 、523 K以上でAl側に $\beta\text{-Mg}_2\text{Al}_3$ 、Mg側に $\gamma\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ が形成されることを明らかにした¹⁵⁾。

(5) データサイエンスの活用

人工知能 (AI) に代表されるデータサイエンスの活用によって、仮想的に接合結果を予測できるようになり、トライアンドエラーの低減が期待できる。Al-Mg系合金のミグ溶接を対象とした溶接構造体の強度予測モデルを構築するため、ニューラルネットワークを用いたミクロ組織予測サブモデル、経験的に知られている真応力-真ひずみの指数則をベースとした強度予測サブモデル、及び引張試験を有限要素法で模擬した強度予測サブモデルの3つの組み合わせを試みた。溶接構造体の応力-ひずみ曲線を計算したところ、引張強さを精度よく予測した¹⁶⁾。また、溶落ちを対象とした要因解析によりネットワーク図を作成し、実験データを用いたベイジアンネットワークを構築したところ、ある入熱条件のもとでは、隙間及び位置ずれに対して溶落ち発生率の変化を的確に評価できるモデルを構築できた¹⁷⁾。データサイエンスは幅広い技術分野での活用が期待されている。(池田剛司)

参考文献

- 1) 田中晃二：本誌，**2** (2015)，182-184.
- 2) 田中晃二，雑賀正章：本誌，**10** (2023)，166-167.
- 3) 熱田 賢，蓬田翔平，鈴木義和：軽金属学会 第125回秋期大会講演概要，(2013)，107-108.
- 4) 蓬田翔平，熱田 賢，鈴木義和：軽金属学会 第126回春期大会講演概要，(2014)，203-204.
- 5) 蓬田翔平，岡田俊哉，鈴木義和，廣瀬明夫，佐野智一，森裕章，本多啓三：軽金属学会 第129回秋期大会講演概要，(2015)，167-168.
- 6) 池田剛司，江崎宏樹：特許第7132829号，(2022)。
- 7) 池田剛司，江崎宏樹：特許第7132830号，(2022)。
- 8) 岡田俊哉，内田壮平，中田一博：本誌，**3** (2016)，41-51.
- 9) 境 利郎，岡田俊哉：特許第6516605号，(2019)。
- 10) 近野佑太郎，福田敏彦：特許第7008392号，(2022)。
- 11) 坂井一成，松原和男，江崎宏樹，福田敏彦：特許第7084830号，(2022)。
- 12) 成田麻未，森 久史，佐藤 尚，渡辺義見，斎藤尚文，千野靖正，花野嘉紀，山田吉徳，箕田 正，田中宏樹：軽金属溶接，**60** (2022)，288-295.
- 13) 森 久史，千野靖正，斎藤尚文，成田麻未，箕田 正，加藤勝也，一谷幸司，田中宏樹：軽金属学会 第142回春期大会講演概要，(2022)，3-4.
- 14) 森 久史，成田麻未，浅井康之介，千野靖正，斎藤尚文，寺崎 正，箕田 正，加藤勝也，田中宏樹：軽金属学会 第143回秋期大会講演概要，(2022)，187-188.
- 15) 森 久史，成田麻未，浅井康之介，斎藤尚文，千野靖正，寺崎 正，箕田 正，加藤勝也，田中宏樹：軽金属溶接，**61** (2023)，362-367.
- 16) 荒木俊雄，岩村信吾，蓬田翔平，井上純哉，源 聡，渡邊誠：本誌，**8** (2021)，37-41.
- 17) 大町奈央子，池田剛司，増田章太，本村陽一：人工知能学会全国大会論文集，Vol. JSAI2021，(2021)，4F4GS10o05.

2.2.6 データサイエンス

近年，ビッグデータやデジタル技術の急速な発展に伴い，様々な分野でデータ駆動アプローチが浸透してきている。その中で，データサイエンス（ここではデータを解析及び利活用するための科学と定義する）の大きな意義は，膨大な製造プロセス等のデータを解析し可視化することで，これまでヒトの知見のみでは発見し得なかった新しい知見や洞察を得ることが可能となることである。データサイエンス応用研究により製造及びビジネスの全体最適化を念頭に置いたソリューションを生み出している。

(1) グラフィカルモデル及び数理モデルを応用した研究

a) 確率モデルとドメイン知識の柔軟な融合に関する研究^{1)~3)}

本研究では，アルミニウムの圧延などの製造プロセスに焦点を当て，慢性的な不良発生の原因を解明し，各種製造効率と品質向上のためのベイジアンネットワーク応用研究が行われた。ベイジアンネットワークは，条件付き確率によって実績データから因果関係図を構築することができる一方，確率モデルのみでは因果関係を直接自動で決めることができないという課題があった。そこで確率モデルとドメイン知識を融合するフレームワークを考案している。この研究では，主に2つの目的が追求されている。①イベント発生の因果関係の可視化：製造プロセス中の各要素が不良発生イベントに対してどのような影響を与えるかを可視化する。②確率モデルとドメイン知識の融合：実データから構築された因果関係図をドメイン知識で完成させる。このフレームワークは複雑な要因がどのように不良発生へ寄与するかを明確にし，従来ヒトの思考では着想できなかった仮説を導き出すことができる。製造プロセスへの本格的応用は未だ途上であるが，現状の課題として，既存データのみでは有意な不良発生率がモデルで表出しない点がある。この手法には改善の余地があり，今後，データ蓄積と継続運用により項目数や件数を増やし，確率モデルとドメイン知識を融合するフレームワークの実用実績を上げていくことが重要である。

b) 機械学習及び数理モデル応用研究^{4),5)}

機械学習・数理モデルの中でも時系列解析を応用した研究が成果として挙げられる。研究例に社内セミナー受講者の参加意欲不足の解決策を探るために行われた例がある。ここではオリジナルのウェブアプリをセミナーで使用し，Hawkes過程（パラメータ・と・で特徴づけられる過去のイベントの影響を受ける点過程）でクリックアクションのデータを収集/モデリングし，介

入効果を定量的に評価した。「研修中にボタンをクリックさせる」という介入を行い、介入前後のボタンクリック回数の変化を分析。この介入には、講師からのクリックの働きかけやWebアプリ中のサインが含まれ、Hawkes過程パラメータ α と β の変動が参加意欲と学習効果に影響を与えることが確認された。ナッジ(行動促進刺激)への慣れやボタンクリックの定型化(考えずにクリックする状況)も観察され今後の課題とされる。

(2) 組織内コミュニケーション改善による品質向上のためのデータサイエンス応用研究^{2), 6)}

データサイエンス応用研究の推進のなか、機械学習を製造やビジネス等のデータに適用しただけでは現状課題が解決できないことが明らかになっている。理由の1つとして隠れた情報の存在がある。具体的には現場における従業員のスキルや経験、チーム間の協力関係などから生じるプロセスと結果は既存データで捉えにくいものの現実の結果に重要な影響を及ぼすことがある。これらの点を回帰系機械学習モデルのみでは解決することが困難である。この課題に対して、コミュニケーションシステムの研究が必要とされる。このシステムはPDEMスパイラルアプローチで特徴づけられ、具体的には以下のフェーズで構成される。

P (Plan) : 計画, D (Do) : 実行, E (Evaluation) = リフレクション。実行したプロセスを振り返り、その結果を分析する。M (Modeling) = リフレーム : 評価結果に基づくモデル修正がなされ、既存の枠組みを新たな視点で人間が再構成し次の計画へ反映する。このシステムはデータ駆動であり未知・不確実要素の多い段階からのソリューション構築着手においても確実性向上に繋げられるものである。

(3) DX人材育成及びロードマッピングに関する研究^{7), 8)}

DXの1つの像として全社的なCPS (Cyber-Physical System) の実現及びビジネスエコシステムの構築がある。全社DXには、その担い手たるDX人材育成の必要性について論じることが重要である。

a) DX人材育成デザイン

従来、デジタル技術はシステム部門と外部委託に依存していたが、全社的なDXには職務ごとのデータサイエンスの習得が重要となる。このため、DX戦略と行動変容を促す人材育成デザインの研究が進められてきた。効果的なDX人材育成プログラムは、社員が新しいスキルや知識を実践する動機付けを行うアクション・リサーチ(実践的な問題解決を目的とした研究方法)の枠組みで推進されている。

b) DXロードマッピング手法

本研究は、NLP(自然言語処理、特にword2vec(単語を数値ベクトルに変換する技術))を用いて従業員の思考とDX技術キーワードのギャップを評価し、カスタマイズされたDXロードマップを設計する手法を考案した。この手法では、心理学的スキーマ(人が情報を整理し、理解するために使うフレームワークやテンプレート)の同化(新しい情報を既存のスキーマに取り込む過程)と調節(スキーマを更新して新しい情報に適應する過程)を通じて、DXに関する新規概念への適應を支援し、従業員がDX技術を受け入れる際の心理的障壁を特定し、克服しながら進むことのできる具体的なロードマップの作成の実現を狙うものである。

今後、数値や自然言語データを解析し、それらを可視化することで、従来の人間の知見では見逃されがちな新たな知見や洞察を得られる可能性は今後ますます高くなり、データサイエンスと数理モデル応用研究の進化が新しい発見の道を開き、製造及びビジネスのイノベーション加速に寄与することが予想される。

(山本佑樹)

参考文献

- 1) 森口隆弘, 浅田勝義, 大町奈央子, 本村陽一: 人工知能学会 全国大会論文集, Vol. JSAI2022, (2022), 2H3GS3b04.
- 2) 上杉真太郎, 大町奈央子, 浅田勝義, 磯田祐世, 岩瀬銀二, 山本佑樹, 本村陽一: 人工知能学会 全国大会論文集, Vol. JSAI2024 (2024), 1C5GS1101.
- 3) 本村陽一, 佐藤泰介: ベイジアンネットワーク-不確実性のモデリング技術-, 人工知能学会誌, **15** (2000), 575-582.
- 4) 野々村真誉, 磯田祐世, 山本佑樹: 第23回情報科学技術フォーラム (FIT2024) 講演論文集第1分冊, (2024), 233-234.
- 5) 吹田駿介, 山本佑樹, 浅田勝義, 山田隆太, 森川貴文: 第23回情報科学技術フォーラム (FIT2024) 講演論文集第3分冊, (2024), 155-156.
- 6) 大町奈央子, 浅田勝義, 磯田祐世, 岩瀬銀二, 上杉真太郎, 山本佑樹, 本村陽一: 人工知能学会 全国大会論文集, Vol. JSAI2024, (2024), 1C5GS1105.
- 7) 磯田祐世, 浅田勝義, 山本佑樹: 情報処理学会IoT 行動変容学研究グループ第3回研究会論文集, (2023), 81-84.
- 8) 磯田祐世, 野々村真誉, 山本佑樹: 第23回情報科学技術フォーラム (FIT2024) 講演論文集第3分冊, (2024), 321-322.

2.3 製造技術

2.3.1 鋳造

鋳造分野における研究開発の内容は、過去10年の前半と後半で大きく異なる。前半は従来型で鋳造実験を中心に、プロセスや鋳塊品質の改善、向上を主に進めてきたが、後半は社会環境からの要求により、カーボンニュートラルへの対応や、DX (Digital Transformation) の推進、デジタルツイン化のためのシミュレーション

技術開発、等に注力した。

(1) DC (Direct Chill) 鑄造技術開発

溶解炉や保持炉での原料溶解においては、生成された酸化物等の介在物が、ユーザでの板材加工時に割れ等の不具合を生じることがある。このうち、原料マグネシウム地金の添加の際には、酸素濃度が極度に低い特殊な炉内雰囲気により窒化マグネシウムが生成され、最終的に、介在物となる窒化アルミニウムが反応生成される。この生成条件やメカニズム¹⁾を解明して、最適なマグネシウム添加方法を実用化した。

鑄塊の結晶粒微細化については、市販の微細化剤ロッド中の微細化剤粒子TiB₂のサイズ分布や空間分布状態(凝集状況)が、微細化性能を支配することを明らかにした。加えて、異質核生成と成長の理論モデルにより、Zr元素等の中毒作用も含めて、微細化剤の性能評価を可能として、各合金種類で最適な微細化剤種類や添加量を理論的に導出できるようになった²⁾。

凝固割れの対策のため、固液共存温度範囲における機械的特性(引張強さ、伸び)を定量的に測定できる装置を導入して活用した。その結果、凝固中の結晶粒径どうしが連結する際の温度における材料強度と発生する熱応力のバランスにより割れ発生が予測できることを見出した³⁾。

今後、DC鑄造技術に関しては、鑄塊厚さを制御できる鑄型の導入、運用や、鑄塊中心部のマクロ負偏析(溶質濃度の低下)の解消技術開発を推進する。

(2) リサイクル技術開発

溶解原料としてアルミニウムスクラップのリサイクルを推進するため、社内活材(製品にならない端材等)や市中スクラップを対象に、リサイクル性の重要な指標となる化学成分や歩留を少量溶解試験によって評価した。また、塗装付き熱交換器用材料は、ドロス発生量を増大させるため溶解前に塗装等を除去する必要がある、その前処理条件を実験的に抽出できる専用試験炉も導入し、塗装除去条件の導出も進めている。そのなかで、熱交換器用材料のアルミフィンと銅管を簡便に分別できる溶解技術を開発して知財化している。

また、リサイクル関係の国家プロジェクトにも積極的に参画している。NEDOの『アルミニウム素材高度資源循環システム構築事業』⁴⁾では、結晶分別法による不純物元素の除去として、鑄物材中の7mass%(以下%)Siを3%Siに低減して、鑄物材を展伸材としてアップグレードリサイクルすることを目的に技術開発している。加えて、得られた原料から縦型CC(Continuous

Casting) 鑄造機にて鑄造材を製造し、その冷却速度の速さを利用して、展伸材であるAl-Mg-Si系(6000系合金)成形用板材と引張強度同等で、伸び0.9倍の達成を目指している。また、カーボンニュートラルに向けて、溶解炉等でのLNG燃料の燃焼によるCO₂排出量を低減すべく、同じくNEDO主導の『アンモニア燃焼炉技術開発』⁵⁾にも参画している。ここでは、LNGに替わり、CO₂排出のないアンモニアや水素を燃料とした溶解炉で、炉内燃焼雰囲気がアルミニウム溶湯品質に及ぼす影響を調査している。

今後、リサイクル関係では、上記の国家プロジェクト目標を達成し、量産実証試験へ移行していく予定である。

(3) DX技術開発

鑄造分野はDX化が遅れており、プロセスの最適化や効率化にはデータ活用の推進が不可欠である。手始めに、溶解炉での種々の実績データを収集して、燃料原単位が低減できる溶解条件をデータ解析、機械学習と実機検証により導出した⁶⁾。この結果を実機炉で活用しており、水平展開も推進中である。その他では、鑄塊割れのデータ解析による対策提案⁷⁾や、鑄造に係る社内業務(試験依頼票のデジタル化、技術サービスデータベース(以下DB)化、介在物クレームDB化、等)のDX化も推進中である。今後の鑄造DX技術については、開発した技術の実機展開を進めていく予定である。

(4) 鑄造シミュレーション技術開発

DC鑄造における型内の溶湯流動や鑄塊内部の温度や内部応力分布、底部のそり変形量についてのシミュレーションは内製ソフトにより実施し、鑄造条件の最適化に適用してきた。更に、鑄塊内のマクロ偏析⁸⁾やチャンネル偏析⁹⁾等の成分偏析もシミュレーションが可能となった。今後は、溶解からDC鑄造までの全鑄造プロセスをシミュレーション可能とし、デジタルツイン化により、高精度でのプロセス再現を目指す。

また、原料溶解¹⁰⁾や熱-流動-応力連成、結晶粒形態のシミュレーションについては推進中であり、フィルタでのろ過プロセスのシミュレーション開発にも着手している。

(5) 鑄物製造技術開発

低圧鑄造法にて、従来の鑄物合金に比べ、耐熱性・耐クリープ性に優れた2000系合金のコンプレッサーホイルの量産技術を開発した。また、展伸材用6063合

金を用いてヒートシンク用ピンフィン製品の開発にも成功、量産技術開発も達成した。今後は、ピンフィン製品で、より性能の高い合金への発展的な展開を推進する。(常川雅功)

参考文献

- 1) Yu Matui, Masaru Morobayashi, Hirohisa Shiomi and Koichi Takahashi: Light Metals 2018, TMS Annual meeting & Exhibition, (2018), 885-893. 本誌, **6** (2019), 2-8.
- 2) 皆川晃広, 古田将吾, 尾村直紀, 村上雄一朗, 常川雅功: 軽金属, **71** (2021), 409-414. 本誌, **11** (2024), 掲載予定
- 3) Nobuto Sakaguchi: Light Metals 2014, TMS Annual meeting & Exhibition, (2014), 315-318.
- 4) https://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP_100195.html
- 5) https://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP_100204.html
- 6) 蓬田翔平, 久保貴司: 日本鑄造工学会 第178回全国講演大会 (2021), No. 16.
- 7) 谷山友理ら: 軽金属学会 第145回秋期大会講演概要, (2023), 265-266.
- 8) 石川宣仁: 軽金属学会 第130回春期大会講演概要, (2016), 229-230.
- 9) Keisuke Kamiya, et al.: Light Metals 2023, TMS Annual meeting & Exhibition, (2023), 989-996.
- 10) 神谷京佑: 軽金属学会 第146春期大会講演概要, (2024), 197-198.

2.3.2 圧延及びシステム制御

生産技術分野としては、脱炭素化への取り組みとしての省エネ化、及び生産年齢人口の減少への対策としての労働生産性の向上がより一層求められている。また近年、大規模データを用いた機械学習の活用により解析技術が飛躍的に向上してきた。

このような背景の中、当社の当研究分野においては、これまで培ってきた高度な圧延・制御技術や現場ノウハウと、最新の解析・シミュレーション技術を組み合わせた研究開発を行っている。特にデータ活用においては、生産現場や研究活動のニーズに即したデータ収集システムや独自の解析アルゴリズムを開発することで、従来技術との組み合わせをより高度にできるようになった。本活動により、10年前は不可能であった高度な自動化や属人性低減、複雑な圧延現象の解明、各圧延機の最高能率での運転等が可能となってきた。

(1) 圧延技術

圧延現象の解明、及びモデル化は永遠のテーマであり、高精度なモデル化が可能となれば、最適な圧延条件の設定や異常検知・予知が可能となり、さらなる高品質化、高効率・高歩留まり化に寄与できる。

熱間粗圧延においてはパスを繰り返す中で上下表層付近が優先的に幅方向に広がり、側面の形状が凹状と

なる、いわゆるダブルバルジ形状が成長する。これが、上下に重なり幅端部で2層になることをラミネーションと呼んでおり(熱間仕上げ圧延後に除去)、これを減少させることで歩留まりを向上させたい。このラミネーション量と圧延条件の関係について、試験圧延機での実験とFEMの活用により整理を行った¹⁾。この結果、ラミネーションの成長挙動を定量的に表現することに成功し、本軽減対策の提案が可能となった。

アルミニウム圧延における大きな課題として、クラッド材の接合メカニズムの解明が挙げられる。当社では、自動車熱交換器用材料をメインに異種のアルミニウム合金板を2層以上に積層し、熱間圧延によって接合するプロセスがとられている。本接合メカニズムについて解明すべくT字引張試験による強度評価手法を確立し、1パス目を低圧下とすることで接合強度が向上することを示した²⁾。本検討の深化により、難クラッド材の安定生産化、及びクラッド材全般の高能率化が期待される。

また、アルミニウム圧延の特徴として、板表面の酸化皮膜がワークロールに転写しロールコーティングが形成される。この生成現象の解明が未だ不十分といった背景から、基礎調査として酸化皮膜厚さがコーティング厚さに与える影響を調査した³⁾。本解明と制御が可能となれば、表面品質不良の発生率を大幅に低減できることから、引き続き検討を行っていく。

(2) 制御技術－品質・生産性向上

当社では、冷間圧延の板厚・形状制御、及び熱間圧延の蛇行制御、張力制御等に独自の多変数制御を適用してきた。2015年にはタイで新たに立ち上げたラヨン製造所にてアルミニウムの一貫生産を実現しており、各種圧延機に当社の制御機能を導入し、高品質かつ最大能率での生産を可能としている。

新規の技術としては、更なる品質要求の高まりに応じた開発を行っている。例えば、板厚変動の要因の一つであるワークロール偏芯の影響を抑制するため、従来手法で想定されていた正弦波だけではなく、任意の周期波形に対応可能かつ先端部から適用可能なロール偏芯制御を開発した⁴⁾。これにより、板厚偏差を全長でより狭い公差範囲内に抑えることが可能となった。

圧延安定化への取り組みとしては、熱間タンデム圧延機において、各スタンドのモータ負荷を監視し、圧延途中で停止しないよう、圧下配分を動的に修正し負荷を平準化する仕組みを開発した⁵⁾。また、同圧延機の尾端部にて板流れ(板センターと圧延機センターのずれが進むこと)を防止する蛇行制御について、制御開始

タイミングとゲインを最適に設定することで蛇行抑制効果を向上させた⁶⁾。これらの機能により大規模トラブルの発生率を大幅に低減できた。また、前記ラヨン製造所の熱間圧延工場の垂直立ち上げにも貢献した。

(3) 制御技術－自動化・属人性低減・データ活用

制御対象の応答性が制御中に大きく変化する場合、一般的に制御性能が低下してしまう。そこで、対象の応答性を動的に予測しつつ、本結果をリアルタイムに制御に反映する手法を開発した⁷⁾。これにより、従来では手動介入が必要であった設備においても、自動で安定した品質での生産が可能となった。

制御対象のパラメータが制御中に変化しないとしても、製造条件(材質や圧延条件)によって大きく異なる場合がある。通常は、上記製造条件を分類してパラメータやゲインを設定しておくが、新規材やレア材においては正しく分類できていないケースがある。そこで、過去の実績と対象材の製造条件を、次元圧縮法により同じ2次元マップ上に写し、その距離関係から最も近い過去の条件を可視化する方法を提案している⁸⁾。本機能はソフト管理やメンテナンス業務での工数削減や属人性低減に大きく寄与している。

生産計画・管理業務としては、キヤノンITソリューションズ株式会社との協業として、厚板材の取り合わせ(母材から複数の製品板を切り出す計画)業務のシステム化を実施した。厚板材では母材から複数の製品を切り出すが、母材自体のサイズも可変である。本計画では、中間板材(半製品の厚板材)への製品の割り当て、及び鋳塊への中間板材の割り当て計画を、多段階の組み合わせ計画問題と定義し、高速な近似アルゴリズムを実装した⁹⁾。本システムの運用により、計画作業時間の短縮、製造歩留まり向上等の効果が得られた。

(4) センシング技術

圧延プロセスの自動化のためには制御対象の状態を正しく計測する必要がある。また、従来人手に頼っていた品質検査等の自動化や、データ解析への活用のためにもセンシングは必須の技術と言える。

前述のロールコーティングの生成メカニズム解明と制御のためには、可能な限りオンラインでコーティング状態を計測する必要がある。東京大学との共同研究として、カメラで撮影したロール表面画像から特徴を抽出し、光学的変化を定量的に処理して、コーティング状態を推定する機能を開発し、良好な実験結果を得た¹⁰⁾。

また、従来の検査装置では困難であったタイプの欠

陥の検出にも挑戦した。通常の照明で陰影を得ることが難しい緩い勾配を持つ凸欠陥に対し、まず、LED線照明を用いて画像を取得し、取得画像から良品画像を予測生成し、次いで、これらの差異から欠陥部を抽出する機能を開発し、本欠陥の検出に成功した¹¹⁾。本検査機により、人手での検査作業を削減することができ、設備の停止時間の減少、人工数削減、属人性の低減等が可能となる。

(前野良太)

参考文献

- 1) 高柳仁史：日本塑性加工学会 圧延工学分科会 第117回研究会(2014)。
- 2) 藤村 崇，藤岡和宏：軽金属学会 第128回春期大会講演概要，(2015)，87-88。
- 3) 當山守人：軽金属学会 第144回春期大会講演概要，(2023)，No. 22，43-44。
- 4) 堂前行宏：特許7103896号。
- 5) 堂前行宏：特許7186489号。
- 6) 藤村 崇，岡村義英，堂前行宏：特許6749732号。
- 7) 前野良太，岡村義英：第56回自動制御連合講演会，(2013)，No. 403。
- 8) 前野良太，堂前行宏，船戸 寧：第64回自動制御連合講演会，(2021)，No. 1G2-1，357-361。
- 9) 江崎洋一，稲田陽光，高柳仁史：日本オペレーションズ・リサーチ学会 2017年秋季研究会，(2017)，No. 1-A-1。
- 10) 立山尚樹，福井 類，割澤伸一，高柳仁史，藤森崇起：塑性と加工，**59**(2018)，235-240。
- 11) 藤森崇起：本誌，**9**(2022)，54-57。

2.3.3 トライボロジー

当社のトライボロジーに関する研究では、主に金属塑性加工に関する技術を中心に取り組んでおり、対象領域はアルミニウム板圧延潤滑とそれ以外の塑性加工に関する技術領域とに分けることができる。板圧延は当社の主軸分野の一つであり、熱間圧延、冷間圧延に関する潤滑、摩擦、摩耗現象について継続的に研究開発を行っている。その他の技術プロセスではプレス加工、打抜き、抽伸、押出、曲げ、拡管加工などがあり、それぞれに対して潤滑剤や使用油脂類の最適化と現象メカニズムの解明、工具及び加工条件の最適化、評価方法の開発、塗布技術の改良などに取り組んでいる。金属塑性加工では、研究対象となる潤滑モードは境界潤滑又は混合潤滑領域が主体となるが、要素技術研究として流体潤滑も含まれる。このように当社のトライボロジーに関する研究対象は幅広いが、ここではUACJ発足後10年間の成果として、アルミニウム板表面品質改良に向けた取り組みを中心に紹介する。

(1) 圧延潤滑と板表面の品質改良

アルミニウム板製品の表面品質については、熱間圧

延工程が大きな影響を与えることが分かっている。そのため、従来の基礎的な調査から深化させ、実工程をより想定した詳細な応用研究と位置付けて、熱間圧延時の潤滑状態の把握¹⁾やコントロール方法の確立¹⁾、ロールコーティングの生成挙動と圧延材表面への移着現象に及ぼす影響の解明²⁾、などを実施してきた。ここでロールコーティングとはアルミニウムが高温で圧延された際にロールに付着して形成されたアルミニウム及びその酸化物粉から成る薄膜であり、圧延時の潤滑状態によりその均一性や板表面への移着挙動が異なり、板表面品質に影響を及ぼすものである。

(2) 板表面品質に及ぼす圧延油成分の影響

圧延油成分に関する研究では、エステル系油性剤の官能基に起因した化学構造の違いにより潤滑性の指標である焼付き限界温度に差が生じること、分子構造に起因した立体障害が油性剤の吸着に及ぼす影響など、まだ不明な点も多いことを明らかにした³⁾。また、油性剤の吸着に関する要素技術の調査として、脂肪酸、脂肪酸エステル、高級アルコールについてその吸着特性の違いを摩擦係数測定及びTOF-SIMS分析により解析し考察した⁴⁾。その結果、アルミニウム表面の酸化皮膜又は機械的摺動により露出された新生面への吸着量は脂肪酸が最も多く、続いて高級アルコール、脂肪酸エステルの順であることを確認した。

圧延時に発生する油中アルミニウム摩耗粉は板面汚れ等の原因になる場合があり、ろ過による除去や圧延油の部分廃棄によりその清浄度を維持している。アルミニウム摩耗粉発生量を低減することは重要であり、その発生メカニズムの解明に取り組んだ。アルミニウム摩耗粉の発生については機械的、材料的要因の影響もあるが、化学的要因として圧延油成分中のオレイン酸添加剤の影響について調査した。その結果、ロールコーティングは凝着摩耗の形態であったが、圧延板面付着アルミニウム粉は凝着摩耗とは異なる形態であったこと、オレイン酸濃度の増加により化学反応が促進され潤滑性は改善するものの、板面付着アルミニウム粉量が増加することが分かった。これらのことからアルミニウム摩耗粉は、化学摩耗によって生じた可能性のあることが類推できた⁵⁾。

(3) 板表面品質に及ぼす圧延設備の影響

圧延設備における機械的要因のひとつとして、圧延ワークロールの表面粗さが板面品質に及ぼす影響について調査した。その結果、圧延ロールの表面粗さの低下により摩擦係数とロールコーティング厚みが減少す

ること、圧延材表面はマクロ的に平坦化するもののミクロ的には潤滑不良である微小な焼付きが増加することを明らかにし、良好な板表面品質を確保するためには適切な圧延ロールの表面粗さを維持することが重要なことを確認した⁶⁾。

また、熱間圧延開始時のロール間への板の導入し易さである噛み込み性に関して、油性剤の種類や量を変えた場合の限界噛み込み角に与えるロール表面粗さの影響をロールコーティングの状態と併せ調査した。その結果、圧延時の摩擦係数だけでなくロールコーティング量とも相関が認められ、その形態にも影響していることが示唆された²⁾。

(4) 板表面品質に及ぼす圧延条件の影響

アルミニウム熱間圧延条件が板表面形状に及ぼす影響について、特に鱗片形状の欠陥に着目してラボで調査を行った。その結果、圧下率の高い加工条件の場合に鱗片形状の欠陥が多く発生することを確認し、そのメカニズムが圧延ロールへのアルミニウムのコーティング堆積に伴う凹凸の転写現象に因るものと推定した⁷⁾。

また、圧延用クーラントの管理について、特に熱間圧延ではエマルションの状態で使用されており、板面品質と関連する場合も多い。クーラントの油性状は管理すべき項目が多く、そのため日々の維持管理は非常に重要である。近年は解析技術を用いた取り組みも多く、機械学習を応用することで圧延油の維持管理を容易にし、得られたデータを解析に利用することで品質の向上にも役立たせることが可能になりつつある⁸⁾。現在では機械学習モデルの改良が進み、試用段階へと進んでいる。

圧延における境界潤滑状態については、アルミニウム熱間及び冷間圧延における金属表面やロール面の制御にポイントを置いた内容について整理し、総論として報告した^{1),9)}。

(5) プレス成形潤滑

圧延以外の課題としてプレス成形潤滑技術の開発も行っており、潤滑プレコートアルミニウム材について報告した¹⁰⁾。その潤滑膜の設計及び構成は、プレス加工前のアルミニウム材の表面にインナーワックスを含有する樹脂層を皮膜形成させ、それによりプレス成形時に高度な潤滑特性を示すというものである。深絞り性や張出し性の調査で、ベア材に潤滑油を塗布して加工するよりも良好な成形特性を示すことを確認した。

潤滑摩擦関連の課題には材料的、化学的、機械的な3

つの要因が深く関わっており、今後もそれぞれを関連付けさせながら研究開発を進めていくことが必要であり重要である。
(竹田委千央)

参考文献

- 1) 野瀬健二, 渡邊貴道: トライボロジスト, **62** (2017), 485-489. 本誌, **5** (2018), 69-73.
- 2) チャッチャイ ラウボムスコン, 村岡佑樹, 鈴木 忍, 渡邊貴道: トライボロジー会議2016 秋予稿集, (2016), No. F11, 474-475.
- 3) 上田 薫, 初野圭一郎, 細見和弘: トライボロジー会議2013 秋予稿集, (2013), No.E10.
- 4) 森尻篤史, 上田 薫, 米光 誠, 森 誠之, 七尾英孝: トライボロジー会議2013 秋予稿集, (2013), No.E11.
- 5) 野村正治: 軽金属学会 第145回秋期大会講演概要, (2023), 129-130.
- 6) 深津明弘, 竹田委千央, 八重樫起郭: トライボロジー会議2022 秋予稿集, (2022), No.D30, 51-52.
- 7) アットナロング チャローンジット, 山田隆太, 野瀬健二, 渡邊貴道: トライボロジー会議2016 秋予稿集, (2016), No.F10, 472-473.
- 8) 吹田駿介, 坂下修梧, 山田隆太, 山本佑樹, 浅田勝義: トライボロジー会議2021 秋予稿集, (2021), No.A26, 53-56.
- 9) 野瀬健二, 渡邊貴道: トライボロジー会議2016 秋予稿集, (2016), No.A14, 29-30.
- 10) 小澤武廣, 上田 薫: プレス技術, **56-2** (2018), 49-52.

2.3.4 押出

アルミニウムの押出はさまざまな断面形状の製品の製造が可能であるため、自動車、二輪車などのほか、レジャー用品、航空機材まで幅広く活用されてきた。近年は環境保護のニーズの高まりにより、軽量化が求められる自動車部品へ適用が進んでおり、アルミニウムの押出材には、高強度化や複雑な断面形状への対応が求められている。2024年5月に米国で開催された ET' 24 (Aluminum Extrusion Technology Seminar & Exposition) では、QFORMやInspired Extrudeを用いた押出シミュレーションによる断面形状の予測や制御に関する講演が多く行われている。国内では、軽金属学会の「押出加工中の溶着制御技術検討研究部会」において、押出材材に対する断面形状複雑化の要望に対し、ホローダイスのチャンバ内の流動制御を行うことによる溶着部の品質向上に向けた取り組みがなされている。当社において過去10年で実施した押出材に関する研究開発事例についてライフスタイル・ヘルスケア、モビリティ、環境・エネルギーの観点から紹介する。

ライフスタイル・ヘルスケア分野においては、スマートフォンの筐体をはじめ高強度でかつ高い意匠性を求められる材料に適した7000系合金(ZK75)を開発した。繊維状組織を有する従来の7000系合金はアルマイト処理後の外観に筋状のアルマイトムラが発生しやす

いため、意匠性の必要な用途には不向きであった。ZK75では化学成分と製造条件の制御により、材料組織全面を等粒状の再結晶組織とすることで、アルマイト後の筋状模様発生を抑制を可能にした¹⁾。モビリティ分野においては、従来T76調質の7000系合金管を縦切削して製造してきたモトクロス用フロントフォークにおいて、T4素管のスピニング加工(ニアネットシェイプ化)⇒人工時効⇒切削工程を開発し、材料ロスを大幅に低減させることに成功した。また、スピニング加工の発熱による復元を利用した加工性向上、さらには最適な合金開発による最適硬さを実現し、軽金属学会より第49回小山田記念賞を受賞した²⁾。また、航空機材料やスポーツ用品の更なる軽量化のために、化学成分及び熱処理条件の最適化により、700 MPa以上の耐力を有するAl-Zn-Mg-Cu系アルミニウム合金の押出材を開発した³⁾。環境・エネルギーの分野では、板材としてのリサイクルが困難なビスマスを含んだブレージングシート屑を活用し、錫とビスマスとの低融点化合物を形成させることにより、切削性に優れた切削加工用アルミニウム押出材を開発した⁴⁾。

2000系や7000系といった熱処理型合金は、溶体化処理や時効処理などの熱処理条件の適切な制御により、高強度化が可能である。高品質な押出製品を安定的に製造するためには、熱処理時の時効析出に関する知見の深化が不可欠であるため、当社では基礎研究も進めている。2000系に関しては、Al-Cu-Mg系アルミニウム合金の焼入れ感受性に及ぼすCu及びMg量と焼入れ速度の影響を明らかにした⁵⁾。7000系に関しては、Zn, Mg, Cu量を広範囲に変化させた7000系アルミニウム合金における自然時効が人工時効処理後の強度に及ぼす影響⁶⁾、7204合金のT6強度に及ぼすCu添加量と自然時効の影響⁷⁾を明らかにした。また、近年添加元素として注目されているScについても研究を行っており、ScとZrの複合添加による5000系⁸⁾及び7000系合金⁹⁾の高強度化の検討も進めた。

研究開発の他にも、2019年12月に当時の㈱UACJ押出加工名古屋 名古屋製作所に4000トンの最新鋭押出機を導入した。本設備はハイブリッド型押出機であり、省エネルギーかつ低ランニングコストで押出機を稼働させることが可能となった。
(新里喜文)

参考文献

- 1) 八太秀周, 渡辺威郎: 特許第6022882, (2016).
- 2) 金兒龍一, 平野克也, 越岡悟史, 加藤勝也, 箕田 正, 中井康博: 軽金属, **65** (2015), 95-100.
- 3) 新里喜文, 八太秀周: 特許第6344816, (2018).
- 4) 高谷 舞, 傍島彩生, 大元涼介, 箕田 正: 特許第7323668,

- (2022).
- 5) 鈴木太一：軽金属学会 第133回秋期大会講演概要，(2017)，163-164.
 - 6) 高谷 舞，箕田 正：軽金属学会 第145回秋期大会講演概要，(2023)，197-198.
 - 7) 愛須優輝，箕田 正：軽金属学会 第139回秋期大会講演概要，(2020)，333-334.
 - 8) 愛須優輝，箕田 正：軽金属学会 第141回秋期大会講演概要，(2021)，67-68.
 - 9) M.Takaya, K.Ichitani and T.Minoda: Materials Transactions, **64** (2023), 421-428. 本誌, **11** (2024), 掲載予定

2.3.5 鋳鍛

鋳鍛分野（鍛造品及び鋳物）の最近10年間の動向をみると、製品の大型化及び機械加工技術の適用増加が顕著に進んだ。当社では、2004年に導入したアルミ専用の鍛造プレスとして国内最大の1万5千トン油圧プレス機に加え、2019年に国内最大規模の有効寸法を有する熱処理炉の稼働を始めた。この大型のプレス機と熱処理炉を活用した大型鍛造品製造技術を活用し、航空・宇宙・防衛産業分野の構造材に使用する強度部材を重工メーカー各社などに供給している。

特に、航空・宇宙分野の強度部材では、機体製造コスト低減のため、結合部を減らす目的で大型鍛造品及び厚板からの一体削り出し（機械加工）部品が多く採用されている。当社でも、これまで鍛造素材（ブロックやリングなどの単純形状品）で受注していた製品に機械加工を加え、顧客の製品形状に近い形状とすることで、製品の付加価値を上げる活動を行っている。これらの製品は顧客にて最終的に肉厚数ミリ程度まで加工される。素材の持つ残留応力が大きい場合には、機械加工の途中で大きな変形が生じることがあり、残留応力が加工精度を低下させる一因となる。とりわけ高強度合金では、焼入れにより発生する残留応力が大きく、その対策は必要不可欠である。そのため、製品の残留応力を材料表面のみでなく、高深度に測定する方法を開発した¹⁾（詳細は、本報2.1.7 航空・宇宙用材料に記載）。

環境負荷軽減や経済性向上等の観点から、アルミニウム合金にリサイクル性が求められるようになってきている。大型鍛造品及び厚板からの機械加工部品では、その機械加工工程で不可避免的に切粉が大量に発生する。切粉は合金毎への分別が困難であるため、付加価値の高いアルミニウム合金として十分にリサイクルできておらず、その多くは鉄鋼製錬プロセスの脱酸剤等としての利用にとどまっている。この課題を解決するために、アルミニウム合金における主要な添加元素であるSi, Fe, Cu, Mn, Mg, Cr, Zn, Tiに加え、航空・宇宙分野の強度部材で多く使用されている7050合金の添加元素であるZr, 2219合金の添加元素であるV及び

2618合金の添加元素であるNiを構成元素とした新たな合金を開発した²⁾。この合金では、製造時の原料として、上述の機械加工工程で発生する切粉を高い割合で配合することできる。

鍛造品及び鋳物が多く採用される自動車及び船舶等におけるターボチャージャーのコンプレッサホイールインペラー、機械式真空ポンプ（ターボ分子ポンプ）の羽根車及び火力発電所などの大型送風機の動翼などの耐熱部品では、100～280℃の高温環境にて100～10000 rpmを超える回転数が与えられる。そのため、これらの耐熱部品では、高温強度に加え、耐クリープ性が要求され、2014合金及び2618合金などの2000系合金が用いられることが多い。上述のように、環境負荷軽減や経済合理性向上等の観点から、アルミニウム合金にリサイクル性が求められるようになってきているため、これら2000系合金でも製造時の原料に切粉を含むスクラップを用いることが多くなっている。2000系合金には、2011合金など低融点元素（Sn, Bi, Pbなど）を含む合金があり、スクラップには、それらが一定の確率で含まれる。低融点元素は高温強度及び耐クリープ性を著しく低下させるため、耐熱部品に用いる製品の原料には含まれるべきではない。そのため、低融点元素の添加量に上限を設けた耐熱部品用合金及びその加工品を開発した³⁾。（大谷良行）

参考文献

- 1) 宮崎 悟，森 久史，田中宏樹：軽金属学会 第136回春期大会講演概要，(2019)，121-122.
- 2) 宮野 学，森祐輝也：特開2023-71611.
- 3) 坂口信人，森祐輝也，森 真俊：特開2022-25498.

3. 結 言

2013年の株式会社UACJの発足とともに、ほぼ同じ規模であった旧2社の研究開発部門が統合され、アルミニウムに関する研究機関としては世界トップレベルの規模の組織が誕生した。そこで行われた10年間の研究開発の成果概要にお目通しいただき、御礼申し上げます。次回の10年間の研究開発成果まとめは2035年頃になり、そこには長期経営ビジョン「UACJ VISION 2030」の達成に貢献した研究開発成果の概要が掲載されることになる。①成長分野・市場での事業規模の拡大、②素材+αの付加価値の拡大、③新規領域の拡大、④環境負荷の低減を牽引した研究開発である。

多くの企業で自前主義の研究開発からの脱却が叫ばれ、各企業に垂直統合された中央研究所ブームが去り、

オープンイノベーションが興隆してから20年以上が経った。この間、当社は多くのユーザ顧客に恵まれたおかげで、数々の研究開発成果を社会実装することができ感謝する。しかしながら VISION 2030 の達成はこの延長線上には無く、さらに広範なユーザとの共創、マーケットとの対話が必須となる。

学界においては、アルミニウムのみならず金属材料の基礎研究は、成熟した分野であることもあり、プレゼンス向上の傾向にはない。一方で、大学、公的研究機関等では、産業界との連携による成果の社会実装の機運は高まり、諸制度も整備されてきている。アルミニウム業界の私共が、こうした機関の諸分野の先端技術をアルミニウム製品に結実させて価値創造に繋げるという使命の重みが増していると、身に沁みて感じている。

本概要でも多く取り上げられている環境対応の研究開発は、社会的要請の益々の高まりとともに、今後も

多くの業界・学界の方々と協業することで、多面的に着実に成果をあげていく。環境対応技術のみならず、素材+ α の付加価値拡大にも、マクロトレンドを捉え、得意としてきた分野に固執せず、マーケットと柔軟に対話する姿勢で取り組む所存である。この概要にお目通しいただき、UACJ との共創のヒントを閃かれた方々からのご連絡を賜りましたならば、望外の幸いである。



内田 秀俊 (Hidetoshi Uchida)

理事

R&D センター 所長

博士 (工学)



兒島 洋一 (Yoichi Kojima)

理事

R&D センター フェロー

博士 (工学)