

TODAY

郷土金沢と先端研究



明星大学連携研究センター 教授
 東京大学 名誉教授
 須賀 唯知

冒頭から私事で恐縮だが、当法人の専務理事・小紫正樹氏と私は、高校・大学と同級で50年来の学友である。高校は金沢大学教育学部附属高校、自由な校風でまた北陸随一の進学校でもあった。

その金沢が誇る伝統工芸が金箔である。金沢の金箔製造は、加賀藩の時代に始まり、途中江戸幕府の金座・銀座での独占のための締付けあったものの、工程ごとにさまざまな和紙を使って打つという技術と細やかな工程管理から品質を上げ、明治以降生産量を伸ばし、今や国内のほぼ100%が金沢で生産されるに至っている。金箔はこのような手作業で0.1 μm(マイクロメータ)以下の薄さにまで叩いて薄く延ばされて出荷される。

このような薄い金箔は2枚重ねると、自重や静電気のため密着し、再び剥がすことは難しい。金表面には伝統的な灰汁処理をした箔打紙から出る潤滑性の高い金属石鹸成分が付着しているが、200℃以上に加熱されるとこれらの有機成分は酸化除去され、金同士の接合が起きる。実際、この金箔の積層面を透過電子顕微鏡で観察すると、粒界転位が観察され(図1)^[1]、原子レベルで金箔同士の接合が起きていることがわ

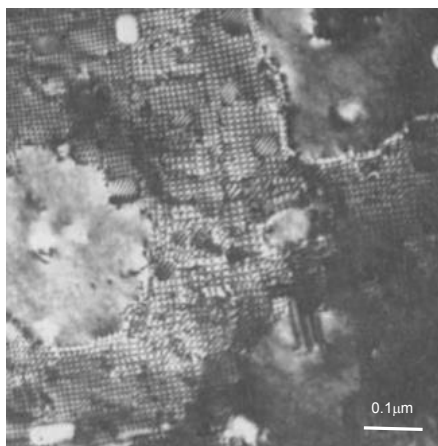


図1 金の薄膜を積層したときに界面に観察される粒界転位(透過電子顕微鏡像)^[1]

かる。これを伝統工芸で実現しているのが、金箔を積層して接合する焼き合わせで、これを使った載金(きりかね)は、仏像などの装飾や現代工芸にも用いられている。

金は酸化しにくく(それゆえに何千年も不変で貴金属と呼ばれる所以である)、表面の有機物や水酸化物などの吸着層を除去すれば、このような直接接合が接触だけで実現する。これに対し、一般の金属や半導体では、表面にはこのような吸着層に加えて、より安定な酸化物が形成されている。そこでこれらの層を除去し、金と同様に金属本来の清浄な表面を露出させてやれば、その表面同士を接触させるだけで、加熱することもなく、その金属や半導体を強固に常温で接合することができる。この表面層の除去をイオンビームやプラズマの照射などの物理的な方法によって行い、原子レベルで表面を清浄化・活性化して常温で接合する方法は表面活性化接合(SAB: Surface Activated Bonding)と呼ばれている^[2]。

図2は、30年前に筆者が提案し、実現した最初の常温接合の例で、サファイアとアルミニウムの常温接合である。当時は、常温接合の可能性はその原理からは理解されても、実際の接合技術として使えるのか、実質的な強度は大きくないのではないかと、というような疑問が呈され、またこの写真も間違えて上下逆さまに掲載されたことから(図右での掲載を意図していたが、掲載されたのは図左であった)、単にサファイアの上にアルミニウムの試料が乗っかっているだけではないかと揶揄されたものである。

また20年程前に、ダイヤモンドとアルミニウムの接合成功がマスコミで放映された際には、マンハッタンで宝飾ダイヤを扱っている人から、デザインの制約になっている留め爪を無くしたいのでダイヤと

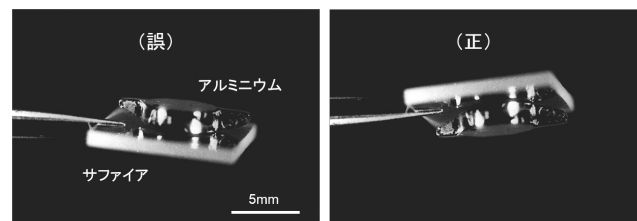


図2 サファイアとアルミニウムを常温接合した最初のサンプル。ピンセットで摘んで持ち上げたところ。実際の強度は引き剥がそうとしても接合面で壊れないくらい強い。図右での掲載を意図していたが、掲載されたのは図左であった。同じ写真であるが、図右のほうがついているように見える。

金属の直接接合はできないかという話があった。その後検討を続けたが、結果的には、表面活性化のためのイオン衝撃や中間層によって僅かに色がついてしまうため、そのままでは宝飾用途としては難しいという結論になり、その研究自体は中断している。

ただ CVD (Chemical Vapor Deposition; 化学気相成長法) ダイアモンド薄膜の研究開発が進み、6 インチウエハサイズ (約 15cm 径) のダイアモンド薄膜も入手可能な時代となった。現在、5G (第 5 世代移動通信) 基地局や衛星通信システム、自動運転システム向けなど、パワーデバイスの小型化・高出力化・高効率化が求められている。しかしそれとともにデバイスの発熱量が増大して、これが安定動作や信頼性向上のネックとなっている。この問題解決の切り札として、絶縁体で熱伝導が最も高い材料であるダイアモンドを放熱基板として使い、パワーデバイス用半導体を低熱抵抗で接合することが考えられる。ただ、これまでダイアモンドと GaN (窒化ガリウム) などの半導体の直接接合技術がなく、それはアイデアにとどまっていた。しかし、表面活性化接合によれば、これらの材料も常温で直接接合することが可能である。実際、昨年、ダイアモンドと GaN の接合界面で世界最小の界面熱抵抗が実証されたことから¹³⁾、その実現への期待は一気に高まっている。また常温接合が従来の接合手法に比較し優位な点として、熱膨張の違う異種材料を接合することも問題なく可能であることがあげられる。現在、携帯電話には各国の周波数で動作を保証するため表面弾性波 (SAW) フィルタが多数内蔵されているが、その多くは常温接合によって製造されている。

ただ、これら先端技術におけるウエハ材料、すなわち、ダイアモンド、GaN、SAW 用ニオブ酸リチウム (LiNbO₃) などの材料開発における中国の追い上げは著しい。また先端接合技術の研究開発や製造プロセスへの投資意欲も高く、日本で始まった表面活性化接合においても、日本の先行メリットはすでに小さくなっていると感じている。

再び、私事に戻るが、金沢の父が去る 11 月に他界した。遺された PC の中に金沢大学を定年退職した頃の 30 年ほど前に行なったらしい講演原稿を見つけた。本来の専門ではなかったはずだが、加賀藩と黒色火薬に関するものであった¹⁴⁾。金沢の実家は、市内はずれの土清水というところにある。清水は湧清水が多いところに見られる地名ということで「しょうず」と読まれる地も多い。土清水は、金沢ではさらになまって「つつちょうず」と発音されているが、今では地元でも読めるひとは少なくなっている。

土清水は、実は、加賀藩の火薬製造所と火薬庫 (煙硝蔵) があったところだという。加賀藩は江戸初期から明治維新まで 250 年あまり日本最大の火薬の生

産地で、品質も日本最高であった。当時の火薬というのは、黒色火薬であり、化学的には硝酸カリウム (煙硝、硝石などと称されていた) に木炭・硫黄を混ぜたものである。金沢城 (今は搦手門 (裏門) の石川門が残るのみである) は、山側から張り出した小立野台地の先端に位置する兼六園の先の深い堀を境にした高台にあり、外堀につながる犀川・浅野川に挿まれ、要害としては最良であるが、水の便は極端に悪い。そのため犀川上流から辰巳用水を引き、兼六園から城内にサイフォンの原理で水を供給していた。その辰巳用水の通り路にあった村が土清水である。その土清水に用水を利用した水車小屋を立て、煙硝と木炭、硫黄を突き混ぜて大量の火薬を調合する火薬製造所が建てられたのである。土清水をさらに山の方へ辿ると金沢の奥座敷ともいわれる湯涌温泉へ突き当たる。その奥を更に遡ると、小矢部川上流から庄川沿いの道を経て、富山の五箇山に出る。五箇山は合掌造りで現在、世界遺産に指定されているが、実は、江戸時代煙硝の国内最大の産地であった。煙硝を作るのに必要な水、養蚕による糞や土があり、外部との交流を遮断して秘密を守りやすいという利便もあったと考えられている。ここで作られた煙硝が土清水の煙硝蔵に運ばれていたのである。

実家には高校までしかおらず、その地の歴史的な位置づけには考えも至らなかった私には、思いがけない情報であった。複雑な工程の上に成り立ち、科学的分析も十分には及ばない伝統工芸や古典技術は、原理を辿れば行き着くところは同じであっても長い時間をかけて最適化を行ってきた結果がいつしか経験として積み重なっている。今、先端技術と呼ばれているものは、実はかなり単純な原理に基づき、だからこそ再現性が確保され工業的に広く使われる技術でもある。しかし一方で、時間をかけて醸成する研究プロセスを経てこそ、他の追従を許さない唯一無二の技術に成熟させることができるのであろう。いまだに先端研究を標榜し、もがいている私も、望郷の念とともに少し反省を込めて、これまでの研究を振り返ることができそうである。

(なおこの小文を亡き父 須賀操平に捧げる。)

文献

- [1] T. Schober & R. W. Balluffi, Dislocation sub-boundary arrays in oriented thin-film bicrystals of gold, The Philosophical Magazine: A Journal of Theoretical Experimental and Applied, (1969) pp. 511-518.
- [2] 須賀唯知: 表面活性化による常温接合とそのメカニズム、応用物理、89 巻 9 号 2020 年 p. 498-508.
- [3] F. Mu, R. He, T. Suga: Room temperature GaN-diamond bonding for high-power GaN-on-diamond devices, Scripta Materialia 150 (2018) 148-151.
- [4] 須賀操平: 加賀藩における火薬の歴史 - 土清水村の塩硝庫 -, (1992) 金沢女子大学紀要第 6 巻 8 頁

著者: 須賀 唯知 (すが ただとも)
略歴 明星大学教授、東京大学名誉教授。1979 年東京大学大学院修士課程修了。マックスプランク金属研究所研究員、東京大学助教授を経て 1993 年より東京大学教授、2019 年定年退職、同 4 月より現職。常温接合技術を提案、実装やエコデザインに関する産学連携にも尽力している。
連絡先 〒 191-8506 東京都日野市程久保 2 丁目 1-1 明星大学連携研究センター E-mail: suga@gakushikai.jp

アルミニウム VISION2050 について

(一社) 日本アルミニウム協会 専務理事 田端 祥久

(一社) 日本アルミニウム協会では、「アルミニウム VISION2050」(以下「アルミ VISION」という。)を策定し、昨年(2020年)9月、公表しました。本稿では、アルミ VISION の訴求点を紹介します。アルミ VISION の本文は、当協会のホームページをご覧ください。¹⁾

1. アルミ VISION の訴求点

(1) 全体コンセプト

アルミの2050年の人類社会への貢献を構想する上でのキーワードは、次のものとした。

「アルミニウムは生まれ変われます」

このコンセプトを表現した図1のポスターを作成し、東京及び大阪の地下鉄の主要駅に掲示を行った(2020年12月)。



図1 アルミの循環性能を訴求するポスター

(2) リサイクル(循環)の目標

国内のアルミ関連製品の生産量(2019年)3,448千トンに対し、投入された新地金は52%の1,807千トンである。すなわち、48%はリサイクル由来の循環アルミ(再生地金)である。

アルミ全体のリサイクル率が高いのは、アルミ鑄造材のほぼ100%が循環アルミで製造されるためである。一方、展伸材での循環アルミの使用比率は低い水準(10%程度)に留まっており、今後の課題は、展伸材で循環アルミの使用を拡大することである。

こうしたことを踏まえて、今後のアルミ展伸材における循環アルミの比率について、次の目標を掲げることとした。

2030年：30%、2050年：50%

この目標に到達するためのロードマップとして、次を掲げた。

- ・スクラップは、アルミニウムの純度が低いものほど量が多い。
- ・現状では、スクラップのアルミニウムの純度が高いアルミ缶は循環利用されている。展伸材全体では循環使用率は10%程度。
- ・行動目標1：社会システムに対応して、循環使用率10%を超える水準を段階的に実現する。
- ・行動目標2：スクラップ選別の技術革新等により、2030年までに、循環使用率30%を目指す。
- ・行動目標3：循環に関する技術革新の完遂により、2050年までに、循環使用率50%を目指す。

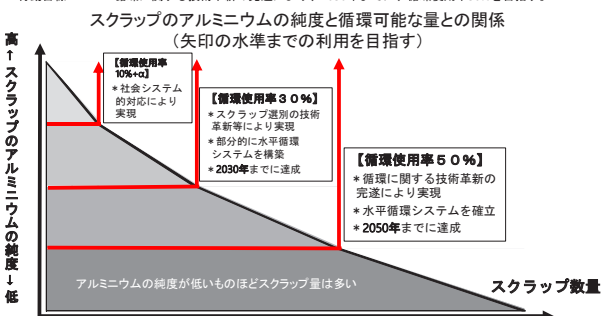


図2 アルミ展伸材における循環使用率の向上の道筋

(3) CO₂ の削減の見込み

CO₂ の削減の見込みについては、先行して、「アルミニウム圧延業界の温暖化対策長期ビジョン」として公表している(2020年3月)。²⁾ 日本で使用されるアルミ展伸材に係るCO₂ 負荷の削減という趣旨で、アルミ地金の製造段階におけるCO₂ の削減も考慮に入れる内容とした。展伸材の製造工程において循環アルミ(再生地金)の投入量を増やし新地金の投入量を減らすことによって、アルミ展伸材の製造に係るCO₂ の合計排出量の削減が可能であるとの考えに基づくものである。

2050年の「地金製造段階を含む展伸材製造時のCO₂ 排出量」の削減の見込みとして、対応可能な対策を踏まえた上で、2017年比で次のとおり設定した。

【シナリオ①】(圧延業における削減努力)：44%削減

- 1) 展伸材製造時のCO₂ 排出量の最小化(従来の省エネ努力の深掘り)
- 2) アルミの高度な資源循環の実現(循環アルミ(再生地金)を最大限に用いる)

【シナリオ②】(①に加え新地金製錬の革新に期待)：68～78%削減

アルミの製錬技術の革新により、新地金のCO₂ 原単位が低減されることに期待する。

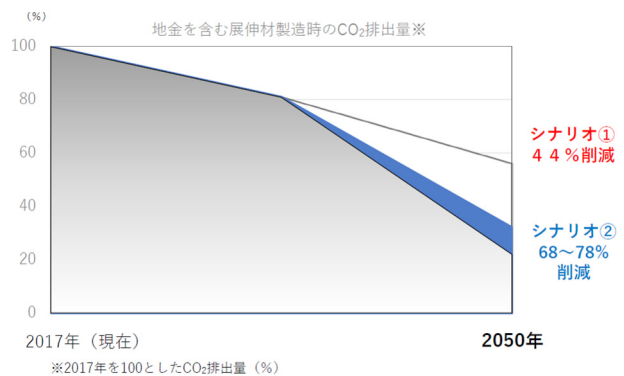


図3 アルミニウム展伸材におけるCO₂ 排出の長期的な削減の方向

(4) アルミに関する研究開発の方向

2020年度に改訂した「アルミニウム技術戦略ロードマップ」に基づき、アルミに期待される役割を果たしていくうえで、特に重要となる技術の内容と、そのキーワードとして、次のとおり掲げた。

- ①アルミの循環(再生)に関する技術革新
キーワード：「アルミニウムは生まれ変われます」
- ②アルミの金属組織の設計に関する技術革新
キーワード：「アルミニウムは実は強いんです」、
「アルミニウムは熱を余さず伝えます」
- ③アルミの接合に関する技術革新
キーワード：「アルミニウムは他材料と上手に協調します」

(5) アルミ需要の見直し

個別需要分野の動向から、2050年までのアルミの国内需要の見通しの試算を行った。

需要分野としては、自動車、建設、飲料缶について、重点的に精査した。また、ロボット、移動通信（5G等）、蓄電池、半導体製造装置、熱交換器における新規需要の顕在化にも注力した。

試算の結果では、2050年のアルミの国内需要は、6,020千トンとなり、2019-2050年の伸び率（年率）は1.2%となった。需要分野別の需要見通しのグラフを図4に掲げる。

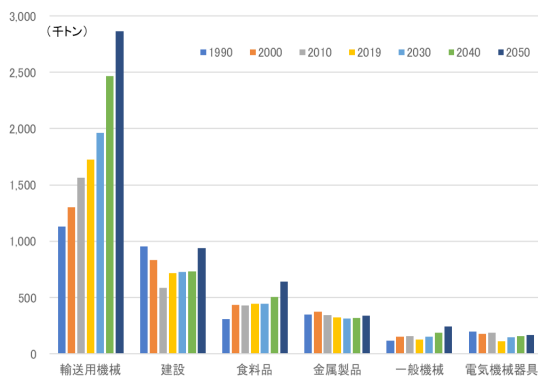


図4 主な需要分野毎のアルミニウム需要量の実績と見直し

目を引くのは、輸送用機械分野の著しい需要増加である。2019年と2050年を比較すると、1,729→2,870千トンと1.7倍に増加するとの見直しとなっている。特に自動車については、軽量化の要請がある中で、アルミの強度、成形性、接合性等の課題が技術革新によって更に改善されることに伴い、アルミの自動車への適用領域が拡大していくことを前提としている。自動車1台当たりのアルミ使用量は、現状（2019年）では172kgであるが、2050年には288kgと見込み、2019年の1.7倍の規模となとした。品種別には、板材（除熱交）で5.4倍、押出材（除熱交）で4.1倍、鋳造材で1.3倍に増加するとの見直しとなっている（熱交向けは横ばい）。

輸送用機械の陰に隠れる感はあるが、建設分野の需要が719→940千トンと1.3倍に増加するとの見直しとなっていることにも注目したい。住宅着工件数の減少とサッシの樹脂化によって、アルミサッシの需要は減少するものの、接合等の製作技術の革新、アルミに適した構造設計の開発が進められるとの前提で、建築構造部材としてのアルミの採用が拡大すると見込んでいる。

2. 自動車のアルミ化による燃費の向上はどれほどか

アルミ VISION 策定の過程で従来何となく定性的に語られていたことの定量化（試算）を行ったり、文献を確認したりすることを通じて、改めて明らかになったこと

や気付きが数多くあった。そのうち、自動車のアルミ化による燃費の向上はどれほどかについて紹介したい。

自動車1台当たりのアルミ使用量が、既述の見通しのとおり、2019年の172kg/台から2050年に288kg/台へと増加すると、標準的な自動車の重量（1,359kg）は、71kg軽量化される。この軽量化によって、自動車の生涯走行時CO₂排出量は約6%削減される。この数字の試算方法について、少し解説したい。

①自動車の燃費の改善

- 軽量化と燃費改善の効果との関係は、100kgの軽量化で1km/Lの燃費改善のような言われ方をするが、定式化されたものとしては次のものがある。^{*3}
 $y = -0.0106x + 30.266$ (x:車両重量kg, y:燃費km/L)
- この式に当てはめると、71kgの軽量化により、燃費は0.75km/L改善する。
- 自動車の生涯走行距離を152,854kmとすると、生涯走行時CO₂排出量は2.05トン減少する(34.7トン→32.6トン)。

②アルミの材料としてのCO₂ 負荷

- アルミ新地金の製造に伴うCO₂ 負荷(kg-CO₂/kg)は、9.24とされ、鉄の2.25よりも大きい。このため、鉄の代わりにアルミを使用することによって、材料に係るCO₂ 負荷は増加する。
- 上記の2050年のアルミの使用量の場合、自動車1台当たりの材料に係るCO₂ 負荷は0.48トン増加する。
- このため、走行時CO₂ 排出量の減少の一部は減殺され、差し引き、自動車のアルミ化によるCO₂ 排出減少量は、1.57トン(2.05-0.48)と試算される。

③アルミ循環の効果によるCO₂ の削減

- 循環アルミのCO₂ 負荷は、アルミ新地金の1/30程度の0.309である。
- 自動車用のアルミ展伸材は、現在は新地金から製造されているが、循環アルミを展伸材に使用する技術が進展しつつある。
- 自動車用のアルミ展伸材の50%が循環アルミによって製造されると仮定した場合、アルミ使用による自動車1台当たりの材料に係るCO₂ 負荷の増加は、既使用分のアルミ材に関するCO₂ 負荷の低減も考慮すると、ゼロ（むしろ減少する）と試算される。
- この結果、②の試算で減殺された分が復元し、自動車のアルミ化によるCO₂ 排出減少量の試算値は、2.08トンとなる。これは自動車の生涯走行時CO₂ 排出量の約6%に相当する。

(文献)

*1 アルミニウム VISION2050

<https://www.aluminum.or.jp/vision2050/>

*2 アルミニウム圧延業界の温暖化対策長期ビジョン（2020年3月）

https://www.aluminum.or.jp/sys_img/files/1585205691_0.pdf

*3 国土交通省資料よりブコク生命作成、「自動車の軽量化の動向」

https://www.fukoku-life.co.jp/economy/report/download/report28_12.pdf

The Japan Research and Development Center for Metals
JRCM NEWS / 第412号

内容に関するご意見、ご質問はJRCM 総務企画部までお寄せください。
本書の内容を無断で複写・複製・転載することを禁じます。

発行 2021年2月1日

発行人 小紫 正樹

発行所 一般財団法人 金属系材料研究開発センター

〒105-0003 東京都港区西新橋一丁目5番11号 第11 東洋海事ビル6階

T E L (03)3592-1282 (代) / FAX (03)3592-1285

ホームページ URL <http://www.jrcm.or.jp/>

E-mail jrcm@oak.ocn.ne.jp