

アルミニウムおよびアルミ合金の微細構造検査用試料作製

アプリケーション ノート

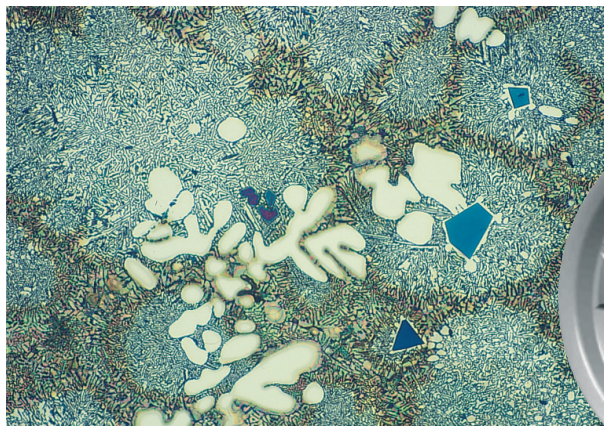
鉄や銅など、他の長い歴史を持つ金属とは異なり、アルミニウムは比較的新しい金属で、19世紀初めまで知られていませんでした。1886年には、現在も使用されているアルミニウムの生産方式、ホール・エルー法が開発されました。

アルミニウムは銀白色の外観を持ち、非常に軽量で、さまざまな用途で純金属または合金として使用されています。強度を高めることができる合金元素はごくわずかです。また、アルミニウム合金は密度が低いため、航空機や航空宇宙産業での用途に特に適しています。自動車業界では、軽量化を促進するためにアルミニウム合金を頻繁に使用しています。

アルミニウムの高い耐食性は、表面に密接につながった酸化アルミニウムの不動態皮膜に基づいています。この酸化被膜は、表面が損傷すると自然に再生することができます。そのため、アルミニウムは琢磨面、ブラシをかけた面やさまざまな色の陽極酸化に適しており、建築業界にとって興味深い材料となっています。

アルミニウムの他の特性には、高い熱伝導率と、鋳造、熱間加工、冷間加工、機械加工による容易な成形性が含まれています。アルミニウムは無味、無毒性であるため、食品や包装業界で好まれ、缶や箔、またはベーカリーや飲料ポンプ用の機械などに適しています。

Al-Li や Ti-Al などの新しい合金は粉末冶金工程によって製造され、アルミニウムは複合材料の金属基としても使用されます。非常に多角的な材料であるアルミニウム



アルミニウム - シリコン系鋳物、モリブデン酸によるカラーエッチング、倍率200x



は、将来、新しい用途のためにより多くの分野を開拓するでしょう。

アルミニウムの金属組織学は結晶粒径の特定や、琢磨およびエッチング試料の微細構造欠陥の特定に関する品質管理に使用されます。また試料は、酸化物やアルミ化ジルコニウムなどの不純物を調べるために頻繁に検査されます(図2)。鋳造アルミニウム合金では形状、相分布、潜在的な多孔性を評価します。鍛造材料では、圧延や押し出し工程からの欠陥が検査され、メッキの厚さが測定されます。



微細構造検査用試料作製時の課題

- 純アルミニウムは非常に柔らかく、機械的な変形や条痕が生じやすい。
- 炭化ケイ素とダイヤモンド砥粒は、試料表面に埋没することがあります。(図1)

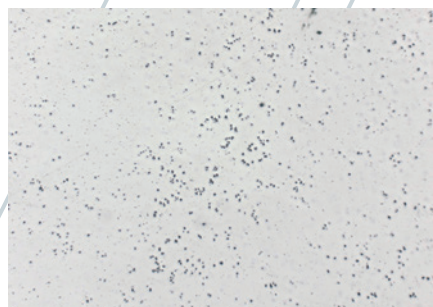


図1: 純アルミニウムに埋没したダイヤモンド粒子、3 μm琢磨後、200x

- 過剰に加工され、変形した鍛造合金は、評価のためにコントラストをつけることが難しくなります。



図2: アルミニウム加圧ダイキャストの表面の酸化物、50x

ソリューション

- 可能な限り細かい砥粒サイズのSiCフオイル／研磨紙で面出し研磨。
- ダイヤモンド琢磨および最終仕上げ研磨は、埋没した全ての粒子を除去するために、十分長く行う必要があります。
- コロイドシリカ懸濁液を使用した最終仕上げ研磨。
- Barker試薬による陽極酸化処理。

アルミニウムの生産と用途

アルミニウムは、地殻の中で最も頻繁に発生する金属の1つです。純粋な状態では見出されず、化合物の形態で組み合わされています。60%の酸化アルミニウムから構成される ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{H}_2\text{O}$) 水酸化物としてのボーキサイトからのみ経済的に抽出することができ、残りは金属酸化物 (Fe_2O_3 , SiO_2 , TiO_2) です。製造工程は複雑でエネルギーを大量に消費し、主に以下に記載する2つの工程に基づいています。

ボーキサイトからの 純アルミナ (酸化アルミニウム、 Al_2O_3) の抽出

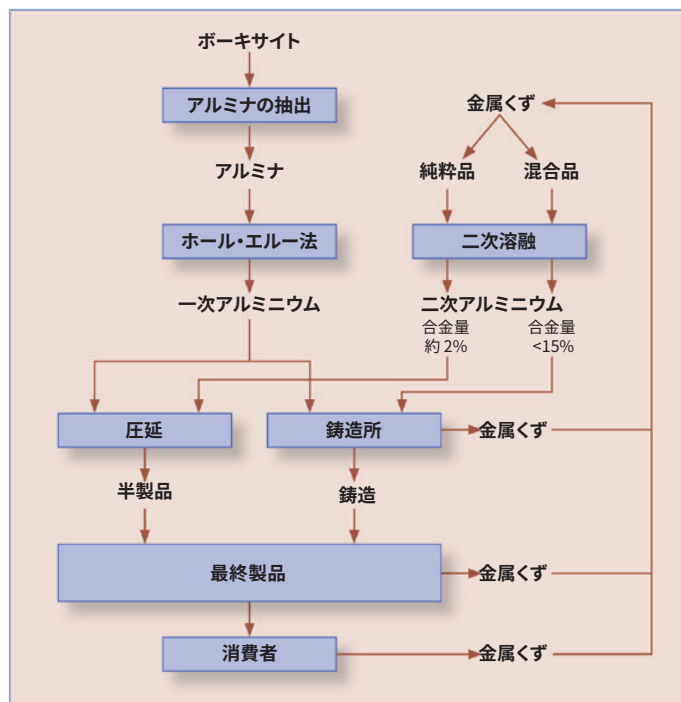
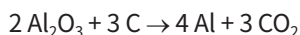
アルミナの抽出はボーキサイトを細くなるまで粉碎し、これを水酸化ナトリウムで圧力下で加熱することから始まります。この工程では、水溶性のアルミン酸ナトリウムが鉄、チタン、ケイ素の不溶解残渣とともに形成され、この「赤泥」と呼ばれる残渣は析出により分離されます。高度に希釈された水酸化アルミニウムナトリウム溶液に、新鮮な水酸化アルミニウムの「種結晶」を添加して、純粋な水酸化アルミニウム ($\text{Al}(\text{OH})_3$) の沈殿を開始します。1200℃で完全な煅焼反応が起きたら、水を除去し、水酸化アルミニウムと純粋な無水アルミナ (酸化アルミニウム) が残ります。

ホール・エルー法

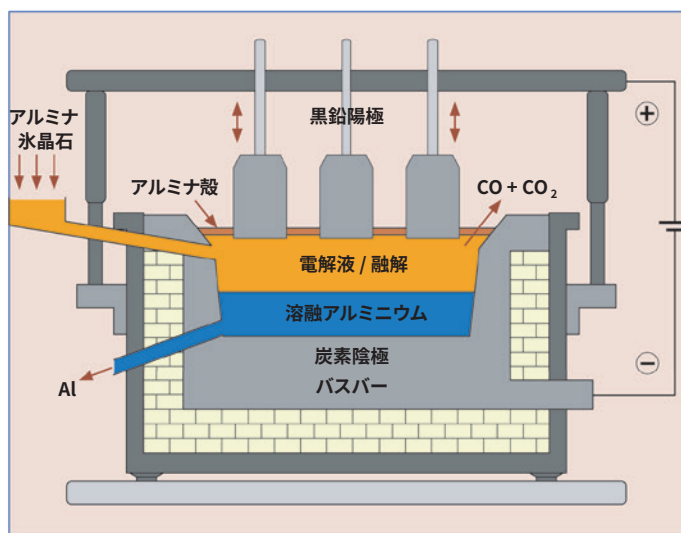
アルミナをアルミニウムに変える

純粋なアルミナの化学反応は、アルミニウムを酸化物から抽出するために、電気化学工程が必要になります。酸化アルミニウムの融点(2050℃)は非常に高いため、氷晶石を混合して融点を950℃に下げます。さらに、氷晶石は導電率を高め、その結果、電気収量を増加させます。

電気分解は炭素鋼または黒鉛鋼で覆われた、電導用の鋼棒を含む大きな鋼鉄容器で行います。炭素鋼で覆われた壁と床は陰極を形成し、酸化アルミニウム - 氷晶石の溶融物は電解質です。炭素ブロックは、陽極として溶解機能の上のラックに吊るされます。電気分解中に炭素陽極はアルミナの酸素に反応し、2次反応では、二酸化炭素の形成とともに金属アルミニウムが生成されます。



アルミニウム製造工程の簡略図。



純アルミニウムを生成する電気分解の概略図。

溶融アルミニウムは、電解質溶融物よりも高い密度を有し、容器の底部に沈殿します。1日1回タップされ、小型のアルミニウムインゴットに鋳造されます。この工程で、純度99.0～99.9%のアルミニウムが生成されます。これらほとんどはアルミニウム合金の生産に使用されます。

電気分解をさらに加えて、半製品ではアルミニウムの純度を99.98%に、インゴットの鋳造では99.99%に上げることができます。この純アルミニウムは非常に耐食性が高く、特に陽極処理に適しています。これらは、化学および食品産業で、装飾トリム、リフレクター、電解コンデンサー用のフォイルおよびチューブなどの光沢製品に使用されます。純度が高くなるとアルミニウムのコストが増加するため、製品に使用するアルミニウムの純度は、その用途の要件によって決まります。

この図は、製造工程におけるアルミニウムのサイクルを示しています。主な製品は、最大2%の合金元素を含む半製品用の鍛造合金と最大15%の合金元素を含む鋳造合金です。

アルミニウム合金は数多く存在し、これらは鍛造合金と鋳造合金に分類されます。これら2つのグループは、熱処理可能な合金と熱処理不可能な合金に更に区別されます。ほんの少量の合金元素を加えると、純アルミニウムの機械的特性と比較して引張強度、降伏強度、硬さが向上します。最も重要な合金の元素は、ケイ素(Si)、マグネシウム(Mg)、銅(Cu)、亜鉛(Zn)、およびマンガン(Mn)です。合金元素とアルミニウムの組み合わせ、または相互の組み合わせ (Mg_2Si , Al_2Cu , MgZn_2 および Al-Fe-Si 化合物) は加工性に影響を与えます。これらの主な共晶化合物は、合金が冷間加工される前に、熱間加工工程中に微細分散される必要があります。



高度に琢磨されたアルミニウムの反射鏡を備えたランプ。

アルミニウム合金の機械的特性を向上する最も重要な工程は、時効硬化です。例えばAlCuMgとAlMgSiのように、温度の低下に伴い合金元素の溶解度が低くなる固溶体が必要です。

自然時効硬化 (例、AlCuMg)。 溶体化処理後、試料は急冷され、その結果固溶体中のAl₂Cuの析出が抑制されます。その後試料は室温下で時効処理されます。この工程中、アルミニウム格子は過飽和溶液から銅を析出します。アルミニウム格子内で生じたひずみが強度と硬度の増加を生み出します。自然硬化は約5〜8日かかります。

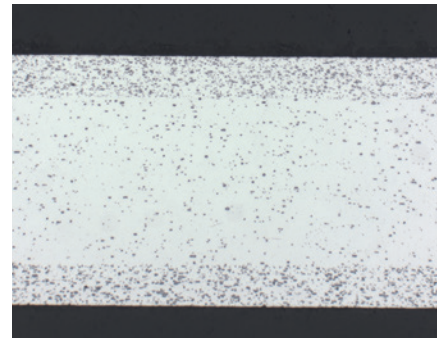
人工時効硬化工程でも、仕組みは上記と同じです。ただし、時効は高温で起こります。AlMgSi合金の場合、時効は溶体化処理と焼入れ後、120-175℃下で、4〜48時間行われます。Mg₂Si相の析出はアルミニウム格子内で内部ひずみを生じ、強度と硬度を高めます。

鍛造合金

圧延用ビレットと圧入用インゴットは、連続鋳造工程で製造されます。多くの場合、鋳造後に均質化のための焼き鈍しが行われます。鋳造構造の鍛造構造への変換は、熱間圧延、押出成形、鍛造によって行われます。この熱間成形後のみ、脆化された共晶粒界構造が分解され、鍛造合金の冷間加工が可能になります (図3-5)。鍛造アルミニウム合金の主要な合金元素は、銅、マグネシウム、亜鉛、およびマンガんです。機械的性質と耐食性、そして要

求される純度と用途によって、ケイ素と鉄は不純物または合金元素となります。

鍛造合金は、例えば、機械工学における板、およびシートや帯鋼などの圧延製品の金型構造、ラジエーターや熱交換器などのメッキ製品に使用されます。特定の機械的特性と高い耐食性を兼ね備えるめっき鋼板には、両面を純アルミニウムで覆って圧延するアルミニウム合金のコアビレットが使われています。これらのメッキ鋼板は、航空機に使われる特定の半製品、またはトリム、リフレクターなどの装飾用途に使用されます。



メッキ板、芯部：アルミニウム合金 3503、メッキ：アルミニウム合金 4104、エッチングなし 100x



メッキ板、芯部：アルミニウム合金 2024、メッキ：アルミニウム 99.5%、Dix and Keller試薬でエッチング、50x

高い強度のアルミニウム鍛造合金は、機械工学、搬送および電気技術用途、およびスノーボード、スキーポール、マウンテンバイク用ギアなどのスポーツおよびレジャー製品に使用されます。アルミニウムは、特に航空機や航空宇宙産業の繊維強化アルミニウムなど、複合材の母材としてますます使用されるようになっていきます。

非硬化合金は冷間加工で硬化される

主要な合金元素	合金番号	合金の例
純度 99%以上、微量のCu, Fe, Si	1xxx	Al 99,0; Al 99,5; Al 99,85
Mn	3xxx	Al-Mn; Al-Cu-Mn-Mg
Mg	5xxx	AlMg3; Al-Mg-Mn-Cr
その他の元素	8xxx	Al-Fe-Si; Al-Li-Mg-Cu

硬化合金は、天然および人工的に硬化される

Cu	2xxx	Al-Cu-Si-Mg
Si	4xxx	Al-Si-Mg
Mg, Si	6xxx	Al-Mg-Si
Zn	7xxx	Al-Zn-Mg-Cu



図3: アルミニウム合金2024、鋳造、粒界での共晶析出、エッチングなし、200x

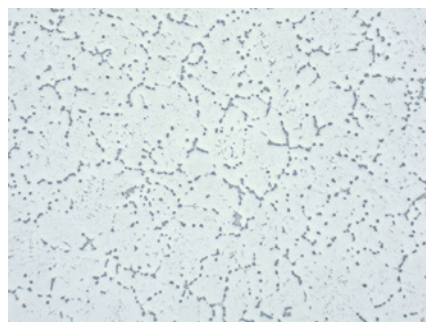


図4: 図3と同様、均質、エッチングなし、200x



図5: 図4と同様、熱間圧延、エッチングなし、200x

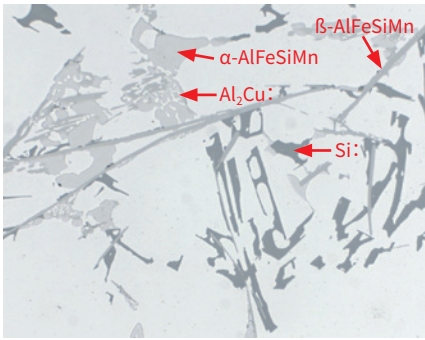


図6: AlSi6Cu4 鑄造、さまざまな相が特徴的な色で識別可能。

鑄造合金

アルミニウム鑄造物は主に金属の機械的性質を改善し、ケイ素、マグネシウムおよび銅などの主要な合金元素に従って区別されます。

固溶体の飽和を超える合金含有量は、ケイ素などの純粋な金属として、あるいは共晶および中間層として析出されます。

ケイ素はアルミニウムの鑄造性を向上します。AlSi12などの共晶合金では、鑄造前に少量のナトリウムを加え、共晶を精製します。この精製工程では、粗針または板として析出する代わりに(図7)、ケイ素がα固溶体により非常に微細な共晶を形成します(図8)。これらの合金の硬化効果は著しく弱いので、マグネシウムを添加して時効硬化を促進します。

鑄造合金は、砂型鑄造、チル鑄造、ダイカストによって製造されます。特定の性質を有する鑄造合金は、ピストン、すべり軸受、機械工学部品、シリンダヘッド、ブレーキシューの製作を含む様々な製品グループに使用されています。

重要な鑄造合金の例とその特性

AlSi10Mg	時効硬化処理 耐振動性と耐食性
AlSi5Cu1	時効硬化処理 良好な鑄造性 溶接、薄片鑄造用
AlMg3	耐塩食性
AlSi25+ Cu Ni	時効硬化処理 特殊合金。ピストン用途、高Si含有による耐摩耗性。
AlMgSiPb	機械加工に最適
AlSi9Cu3	鑄造可能なユニバーサル合金。 加圧ダイキャストに最も重要な合金。

純度が高くなると、アルミニウムは柔らかくなり、機械的な変形や条痕が生じやす

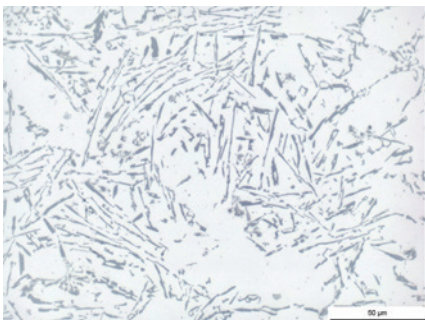


図7: アルミニウム - シリコン鑄造、未精製、500x

アルミニウムおよびアルミニウム合金の試料作製における課題

くなります。従って、純度の高いアルミニウムでは研磨が深い変形を起こす可能性があります。

研磨と琢磨の研磨剤が表面に埋没することがあります。合金含有量が増加するにつれ、アルミニウムは硬くなります。鑄造合金の試料は比較的簡単に作製できます。しかしアルミニウム基材は構造分析の誤りを避けるために、よく琢磨する必要があります(図9と10を参照)。

アルミニウムを切断するには、一般的に非鉄金属に適した硬質な炭化ケイ素砥粒の切断ホイールを使用します。

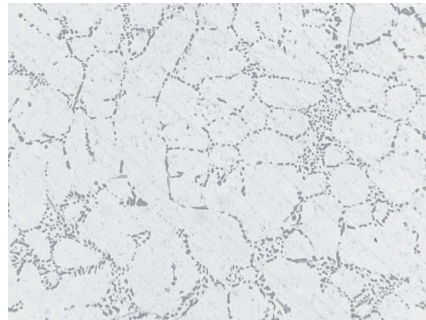


図9: アルミニウム - シリコン鑄造、3 μmのダイヤモンド琢磨後、まだ小傷が見える、200x



図10: 図9をOP-U懸濁液で精密に琢磨した後。基材が十分琢磨され、共晶がより明瞭なコントラストを示している、200x

アルミニウムおよびアルミニウム合金の試料作製における推奨

通常、**埋込み**にはフェノール樹脂で十分です。陽極酸化させるシートや試料は硬化が遅いエポキシ樹脂に埋込み、埋込みの後ろから試料を突き出させて電気接触部としての役目を果たすようにします。

機械的な研磨と琢磨

面出し研磨は、過度の機械的な変形を避けるために、可能な限り細かい砥粒サイズで行うことをお勧めします。硬さ、大きさ、試料の数を考慮しますが、純アルミニウムの大きな試料でも、面出し研磨には #500 で十分です。アルミニウム合金の大きめの鑄造部品は、#220 または #320 で研磨します。深い変形や研磨フォイル／紙と試料表面の間の摩擦を避けるため、加圧力はなるべく低く抑えることが重要です。純アルミニウムに対して比較的高めになっていることがあります。

ダイヤモンド琢磨は、研磨からの深い条痕が全て取り除かれるまで実施します。水溶性成分を同定する場合、無水のダイヤモンド懸濁液とルーブリカントで琢磨することをお勧めします。琢磨中にダイヤモンド粒子が表面に埋没した場合、二酸化ケイ素懸濁液による以下の最終琢磨は比較的長くなることがあります(図1参照)。多くの場合、肉眼で試料表面に明るくすんだ部分があるのがわかります。これは、仕上げ研磨がまだ不十分であることを示しています。埋没した砥粒が構造の誤った解釈につながる可能性があります。OP-U懸濁液で1分琢磨した後、顕微鏡で試料を確認します。必要に応じて、さらに1分間琢磨を続け、試料を再確認します。要求される品質が得られるまで、この琢磨 / 確認の繰り返しをお勧めします。

(琢磨終了の約20～30秒前に、琢磨布に水をかけ、試料と布を洗います。次に、試料を水道のきれいな水



アルミニウム鑄造部品を含む機械工学部品の内面。

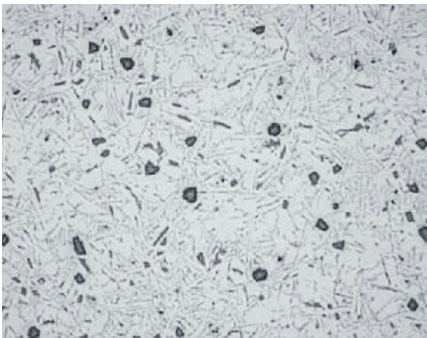


図11: アルミニウム - シリコン系鋳物、OP-S懸濁液で長く琢磨しすぎたもの。ケイ素析出物が浮彫として顕在化する。100x

で再度洗い乾燥します。注記：二酸化ケイ素懸濁液OP-Sノンドライで琢磨しすぎると、顕著な浮彫が生じることがあります。図11参照。

以下のデータは径30 mmに埋込んだ試料を自動研磨機で作製したものです。

アルミニウム - シリコン系鋳物 研磨				
	作業工程	PG	FG	
	作業面	MD-モルト	MD-ラルゴ	
	研磨剤	種類	ダイヤモンド	ダイヤモンド
		サイズ	#220	9 μm
	懸濁液/潤滑剤	水	ダイヤモンド Allegro/Largo	
	Rpm	300	150	
	加圧力[N]/試料	25	30	
	時間(分)	平面まで	4	
琢磨				
	作業工程	DP	OP	
	作業面	MD-Mol*	MD-Chem	
	研磨剤	種類	ダイヤモンド	コロイダルシリカ
		サイズ	3 μm	0.04 μm
	懸濁液/潤滑剤	ダイヤモンド Mol R3	OP-U ノンドライ懸濁液	
	Rpm	150	150	
	加圧力[N]/試料	25	15	
	時間(分)	3	1	
*代替製品 MD-Dac				

電解研磨 は、純アルミニウムおよび鍛造合金に特に適しています。条痕のない表面を残し、短時間で再現性高い結果を提供するため、品質管理でよく使用されます。100倍の観察で日常的な結晶粒サイズの決定には、#1000 SiCフォイル / 研磨紙による予備研磨で十分です。圧延または絞り加工された表面は、研磨または琢磨は必要ありません。純アルミニウムと結晶粒の精密検査には、試料は電解研磨前に #2000まで、時には #4000まで研磨します。鋳造合金には多くの異なる相があるため、電解研磨には適していません。

迅速で再現可能な結果を実現するために、品質管理によく使用されています。100倍観察でのルーチンの結晶粒度決定には、研磨前試料と#1000のSiC フォイル / 研磨紙で十分です。

純アルミニウム 研磨				
作業工程	PG	FG 1	FG 2	FG 3
作業面	フォイル / 研磨紙*	フォイル / 研磨紙*	フォイル / 研磨紙*	フォイル / 研磨紙*
研磨剤	種類	SiC	SiC	SiC
	サイズ	#320/500	#800	#1200
懸濁液/ループリカント	水	水	水	水
Rpm	300	300	300	300
加圧力[N]/試料	25	25	25	25
時間(分)	平面まで	0.5	0.5	0.5

琢磨			
作業工程	DP	OP	*粗い条痕を避けるには、研磨前にSiCフォイルまたは研磨紙にワックスをこすりつけます。 ** 代替製品 MD-Dac
作業面	MD-Mol**	MD-Chem	
研磨剤	種類	ダイヤモンド	
	サイズ	3 μm	
懸濁液/ループリカント	ダイヤモンド Mol R3	OP-U または OP-S	
Rpm	150	150	
加圧力[N]/試料	25	15	
時間(分)	4	2-5	

純アルミニウム、代替研磨条件 研磨			
作業工程	PG	FG	
作業面	フォイル / 研磨紙*	MD-Pan	
研磨剤	種類	SiC	ダイヤモンド
	サイズ	#320	15 μm
懸濁液/ループリカント	水	ダイヤモンド Pan 15 μm	
Rpm	300	150	
加圧力[N]/試料	25	25	
時間(分)	平面まで	5	

琢磨			
作業工程	DP	OP	
作業面	MD-Dac 3 または MD/Dur 3	MD-Chem	
研磨剤	種類	ダイヤモンド	コロイダルシリカ
	サイズ	3 μm	0.25μm
懸濁液/ループリカント	ダイヤモンド Dur 3	OP-U または OP-S	
Rpm	150	150	
加圧力[N]/試料	25	15	
時間(分)	4	2-5	
*粗い条痕を避けるには、研磨前にSiCフォイルまたは研磨紙にワックスをこすりつけます。			

電解液:	A2
マスク:	2 cm ²
電圧:	39 V
流量:	10
時間:	20 秒

琢磨後、試料をBarker試薬で陽極酸化処理すると結晶粒サイズ評価に特に適したカラーコントラストが得られます。色効果

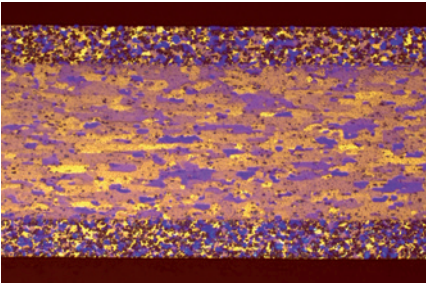


図12: メッキ板、陽極酸化処理、粒の領域が明瞭に視覚化され、自動画像分析に適する、λ1/4板付き偏光、100x

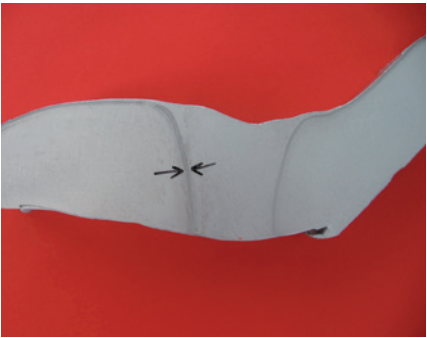


図13: アルミプレス部品、マクロエッチング、最終製品の表面に悪影響を及ぼす主要な析出物と異種の析出物が見られる。

を得るには、試料をλ1/4 鋭敏色板を使用して、偏光下で観察します。(図 12)

電解液:	水 200 ml フルオロホウ酸 (35%) 10ml (Barker試薬)
マスク:	2 cm ²
電圧:	24 V
流量:	8
時間:	1〜2 分

エッチングと組織
マクロエッチング液は結晶粒度評価に使用されます。また、押出し加工による流線を示し、溶接の継目を明らかにします。(図13)
エッチング前に#1200または#2400で試料を研磨します。

アルミニウムは様々な合金化の可能性があり、多種多様な異なる相をもたらし、多成分合金のいくつかでは必ずしも明確に識別できません。良く知られている相は、以下のような特徴的な色を示します (図6も参照のこと)：

Si	灰色
Mg ₂ Si	琢磨中の光沢を失った濃青色 (鋳造中: 中国語のスク립ト)
Al ₂ Cu	ピンクがかった茶色、銅色
Al ₆ Mn	薄い灰色

合金含有量によっては、共晶相が典型的な共晶の形状によって認識される場合があります。関連文献には、これらの相を識別するために使用できるエッチング液がリストされています。(図 15 および 16)

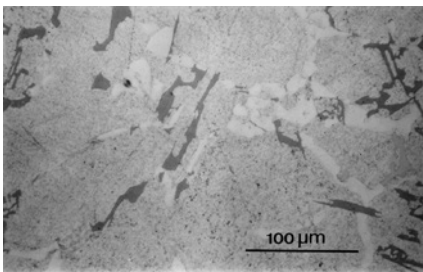


図15: 6%のSiと10%の銅からなる実験的なアルミニウム合金、エッチング前

またフォイルや非常に薄いシート片など、ひどく変形した構造を持つ鍛造合金は、化学的なエッチング液ではコントラストがでにくいことがあります。これにより自動画像分析が困難になります。時折、Barker試薬でも自動画像分析用のコントラストが不十分な場合があります。このような場合、Barker試薬で試料を陽極酸化処理し、顕微鏡を使用して構造を「手動」で評価することをお勧めします。

鍛造合金の仕様によっては画像分析の精度に欠けるため、「手動」で結晶粒度の特定が必要になります。

エッチング液

注記: 化学薬品を取り扱う場合、標準の安全対策を行う必要があります。

マクロエッチング

純アルミニウム用 水 90ml
 塩酸 15 ml
 フッ化水素酸 10 ml

一次樹枝状組織を同定するための長時間エッチング
 水 100 ml
 水酸化ナトリウム 10-25 g

マクロエッチング

Flick試薬
 ほとんどの種類のアルミニウムと合金の粒界エッチング用

水 90-100 ml
 フッ化水素酸 0.1-10 ml

Dix and Keller試薬
 銅アルミニウム合金の粒子領域エッチング、純アルミニウムにも適する

水 190 ml
 硝酸 5 ml
 塩酸 10 ml
 フッ化水素酸 2 ml

カラーエッチング液

KlemmまたはWeck法による
 モリブデン酸溶液

まとめ

低密度、高強度、耐食性のアルミニウムとアルミニウム合金は、自動車、航空機、宇宙、包装、その他の産業における多くの応用に最適な材料です。金属組織学は結晶粒度の特定、相の評価、不純物、および機械的欠陥に関する品質管理に使われています。純アルミニウムは非常に変形しやすいため、粗いグリッドで研磨すべきではありません。埋め込まれたダイヤモンド粒子を試料表面から完全に除去するには、二酸化ケイ素の懸濁液で徹底的な最終琢磨を行う必要があります。アルミニウム casting 合金は、比較的簡

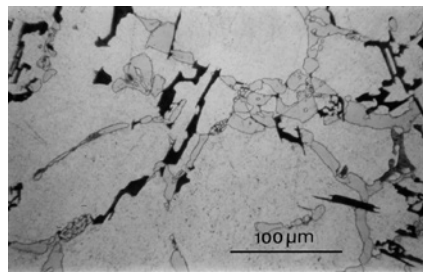


図16: 図15と同じ視野で1 gのモリブデン酸の200 mlの水溶液と6 gの塩化アンモニウムで30秒間エッチングしたもの。
 ケイ素は濃紺で灰色がかったCuAl₂と識別可能

単に琢磨できます。結晶粒度解析には、Barker試薬による陽極酸化処理を使用することで、化学的なエッチングより優れたコントラストを得ることができます。鋳造合金の様々な相は、特徴的な色で識別するか、特定の相に作用する選択エッチングを行うことにより識別できます。

執筆者

エリザベス・ワイトマン、
 アンネ・グエスニエル、Struers A/S、コペンハーゲン

謝辞

オーストリア、ランスホーフエンのAMAG Roll GmbHに試料の提供と、3ページのランプを使用した写真の複製許可をいただいたことに感謝申し上げます。ペトラ・マーチ氏とラインハート・ラチリツ博士のサポートに特に感謝申し上げます。

またオーストリア、ランスホーフエンのAustria Alu-Guss-Gesellschaft G.m.b.H.にページ1のアルミニウムの車輪リムの写真を複製する許可をいただいたことにお礼を申し上げます。

デンマーク、オーフス、デンマーク工科大学のトーマス・ツイーグ氏に図17を再現する許可をいただいたことに感謝申し上げます。

参考文献

Structure 38, Thomas, Zwieg, Danish Institute of Technology, Aarhus, Denmark, A universal method for the mechanical preparation of aluminium alloy specimens with high edge retention and their subsequent colour etching.

Structure 8, Etching of aluminium alloys, Dr. Philippe Lienard, Prof. Clement Pacque, Faculte Polytechnique de Mons, Belgium

ASM Handbook, Vol. 9, Metallography and Microstructures, ASM, 2004.

Metals Handbook, Desk edition, ASM, 1997

Informationsmaterial des Gesamtverbands Deutscher Metallgießereien e.V., Düsseldorf.

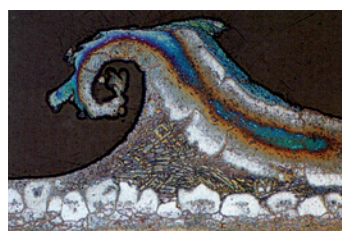


図17: 水酸化ナトリウムで予めエッチングされた熱交換器のはんだ部分のバリ、Weck法に従って過マンガニ酸カリウムでカラーエッチングしたもの。