

**ものづくり基礎講座 金属の魅力をみなおそう**  
**観察・分析編 第1回 組織観察 (第49回技術セミナー)**

東北大学金属材料研究所 正橋直哉

**1. はじめに**

金属製品の強度や加工性等の機能は、大きく分けると成分元素と組織の影響を受けます。同じ成分からなる合金（複数の元素から構成されるものを「合金」と称します）でも、結晶粒のサイズを小さくした時と大きい時では強度が異なり、小さいほど強度が高くなります。通常の金属材料は多くの結晶粒から形成され（「多結晶」と称します）、単一の結晶粒からなる材料（「単結晶」と称します）は結晶粒と結晶粒との境界（「結晶粒界」と称します）が存在しませんから、粒界破壊や粒界腐食など粒界が関与するトラブルは起こりません。金属の結晶粒の大きさを調べるには、粒界を際立たせる必要があります。そのためには金属を研磨してから腐食液に漬ける（「エッチング」と称します）、光学顕微鏡で観察します。図1は純鉄を圧延してから、様々な温度に10分間保持後に炉冷した時の光学顕微鏡写真です。(a)は圧延加工組織で結晶粒が観察できず、350°Cの熱処理材(b)でも同様です。しかし400°C(c)の熱処理により、結晶粒を観察することができ、熱処理温度を高くするにつれて結晶粒径が大きくなっていることが判ります。これは加工によって導入されたひずみが熱処理により結晶粒形成に消費されることの顕れで、これを「再結晶」と称します。再結晶粒は熱処理温度が高くなるほど、粒成長をおこして粗大粒となります。

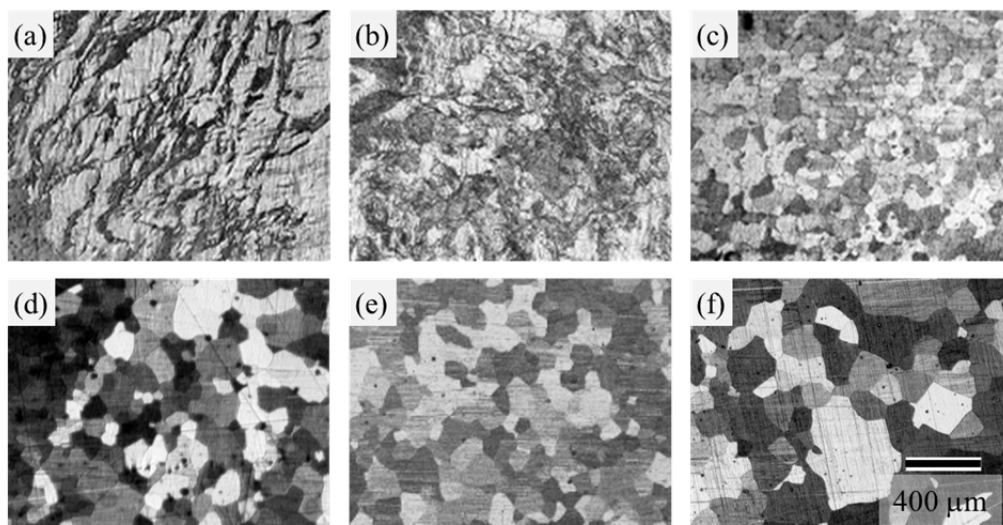


図1 純鉄再結晶の光学顕微鏡組織写真:(a)圧延材および、(b)350°C、(c)400°C、(d)600°C、(e)750°C、(f)900°Cの各温度で10分間保持後の組織

図 1(b)はまさに再結晶が起こる直前ですが、50°Cだけ熱処理温度を上げることで再結晶が起こります。図 2 は、金属材料の降伏応力や破壊応力と温度の関係を模式的に描いた図ですが、細粒（赤線）の方が粗粒（青線）よりも降伏応力も破壊応力も高いことが判ります。一般的に金属材料は温度の低下と共に、強度は増加しますが、加工性も低下するため、ある温度で破壊応力が降伏応力より高くなります。この温度を「延性脆性遷移温度」と称し、細粒の場合の延性脆性遷移温度  $T_F$  は粗粒の場合の  $T_C$  より低いため、細粒では粗粒より低温で強くなることが判ります。

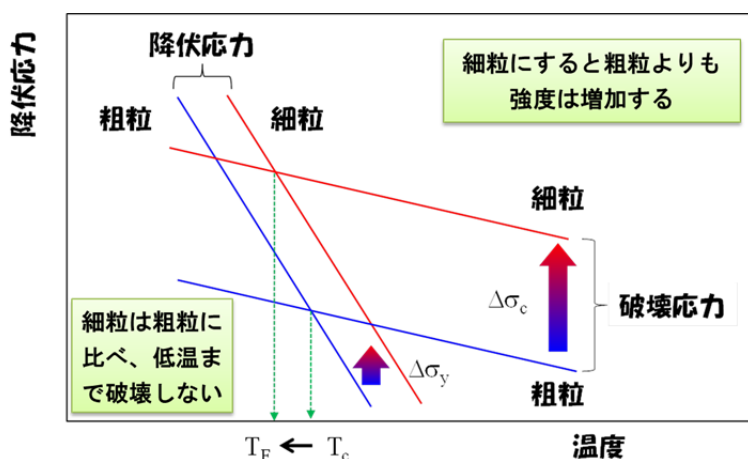


図 2 細粒(赤線)と粗粒(青線)の金属材料の降伏応力や破壊応力と温度の関係:降伏応力も破壊応力も細粒ほど高く、延性脆性遷移温度は細粒にすることで、 $T_C$  から  $T_F$  に低下し、より低温で強くなる

この様に組織を観察することで、材料内部でどのようなことが起きているかを推察することが可能ですが、さらに、組織からどのような機能が得られるかを予想することができます。すなわち所望の機能を有する材料の開発や製造において、「組織観察」は不可欠な工程と言えるでしょう。

## 2. 組織観察の目的

金属材料の機能は組織に強く影響しますが、本項では組織観察を行うポイントについて記載します。金属材料の強化法は、①結晶粒微細化、②加工硬化、③析出硬化、④固溶強化、の4つに大別できます。④の固溶強化とは金属の母相に他の元素を添加して、結晶格子を歪ませるか、剛性を変えることで強化する方法ですが、相や構造に変化がないため光学顕微鏡レベルでは強化に直結する組織変化を観察することはできません。一方、①は図 1(c)-(f)の様に結晶粒界の出現頻度で確認でき、②は加工組織として図 1(a)(b)の様に観察することができます。③は母相とは異なる組成から構成される析出物による強化ですが、エッチングのされ方が母相と析出物では異なりますから、やはり組織として観察することができます。

それでは具体的に、どのような点に注意して組織観察をしたらよいのでしょうか。図 3 に結晶化した組織について組織観察のポイントを示します。金属材料の組織は、

内部で起こっている様々な現象を反映し、図中に記した観察すべき点は、まさに金属内部の反応を推察するのに役立ちます。そのためにはどのような組織が現れたらどのようなことが金属の内部で起こっているかをあらかじめ知っておかなければなりません。これは金属によって異なりますので詳細に記載することはできませんが、一般的なポイントの第一は添加元素が固溶限内にあるかどうかでしょう。固溶限をこえると添加元素は析出物あるいは異物として現れますが、固溶限は状態図から調べることができます。析出物が観察されたとき、その形態と析出場所に注意を払う必要があります。一般に析出は粒界などのエネルギーの高い箇所に優先し、表面積を小さくするために球状になることが多いと考えられます（勿論、針状や角状の形態もあります）。第二のポイントは結晶粒サイズや形態です。図1で示したように結晶粒のサイズは、材料がどのような履歴を経たかを推察する指標です。その形態が等方的でない場合は、特別な方向に結晶成長を促す力が働いていると考えることができます。第三のポイントは、クラックやボイド等が観察できるかどうかです。これらは破壊の起点になる可能性が高いことから、丁寧に観察することが大切です。クラックやボイドは欠陥と称しますが、欠陥は過度の歪みが材料に蓄積されることが主な発生原因です。どんな些細なことでも観察を丁寧に行うことで、材料内部で何が起こったかを推察し、機能発現の理解を深めることができるはずです。

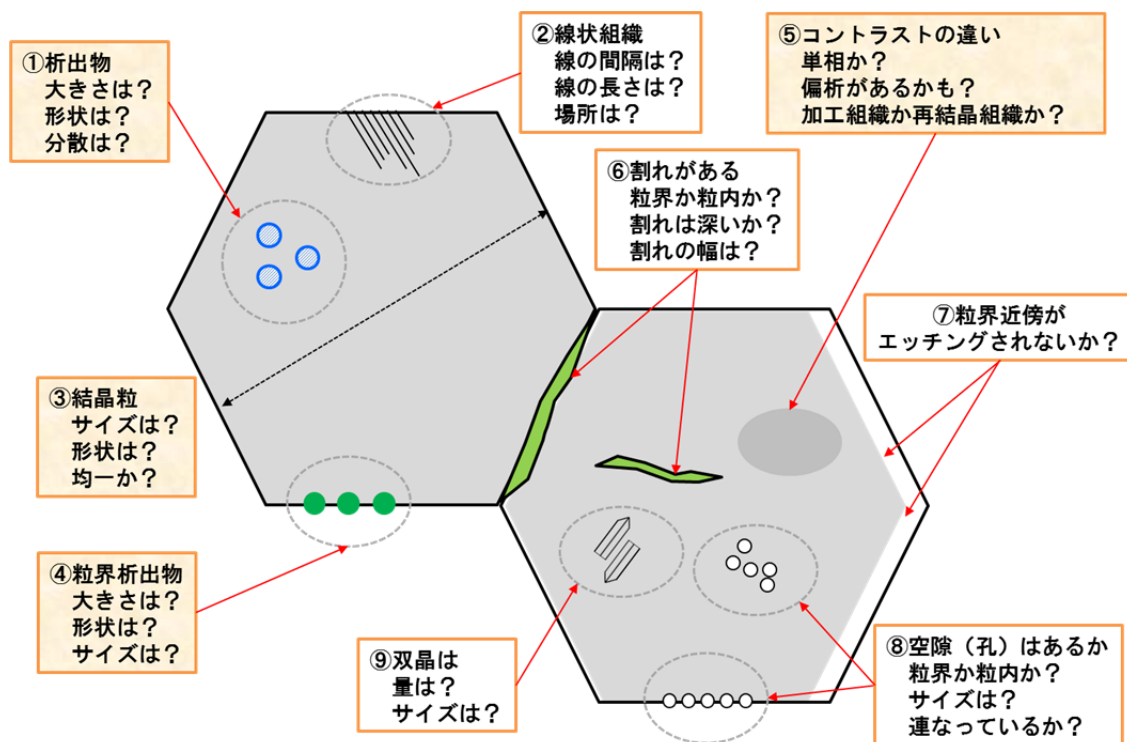


図3 組織観察のポイント

### 3. 組織観察用試料の調整

この項では、具体的な組織観察の手順を紹介します。1項で記載したように、組織観察では試料を研磨後にエッチングを施しますが、エッチングが不適切ですと、観察したい箇所が観察できず、エッチング条件（エッチング液、時間、温度等）の最適化が重要です。またエッチング前の試料調整も重要ですが、調整とは研磨用試料の切り出しと、エッチング前の鏡面研磨が該当します。切り出しは通常、精密切断機や放電加工機等で、観察したい箇所が損傷しないように行います。研磨は金属試料よりも硬い粒子で表面を磨く作業ですが、通常、機械研磨の後にバフ研磨を施します。研磨は切り出した試料の観察面の凹凸や変形した領域、そして汚染された箇所を取り除く工程と、その後に鏡面にまで磨く工程に判れます。一般に研磨材として前者は100 μm~数 μm程度のSiC砥粒を、後者は数 μm以下のAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>やダイヤモンド砥粒を使用します。砥粒サイズの大きいものから小さいものへと順番に研磨を行いますが、研磨材のサイズを変えるごとに、表面を洗浄しそれまで使用した研磨材を洗浄除去します。また研磨方向は直角に向きを変え、それまで使用してきた研磨材による研磨キズが消失するまで研磨します。バフ研磨の場合は1 μm以下の砥粒を懸濁したスラリー状の液を専用の研磨布にしみこませて行います。図4は研磨後の表面模式図ですが、表面の凸部は研磨過程で凹部に押し込まれ、オレンジ色破線の様な層を形成します。この層は強変形と共に研磨材を混入します。その下の層は研磨歪みにより変形した領域で表面から深くなるほど変形量は少なくなり、この等変形線はオレンジ色の破線を継承します。図5に研磨面の傷の深さ、変形部厚さ、攪乱層厚みと研磨材粒度の関係を示します。青線で示した傷の深さは研磨材の粒子サイズが大きいほど増加し、図4の変形部の厚さはある深さ以降では一定となります。上述の様に研磨はサイズの大きい砥粒から小さい砥粒へと変えて行いますので、図5の右から左へと変遷し、最終的に変形部の深さ（緑線）を消失させます。

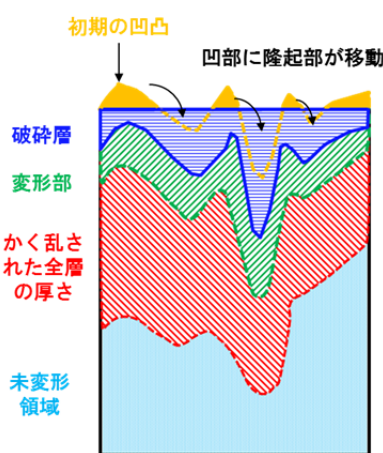


図4 機械研磨後の表面の模式図

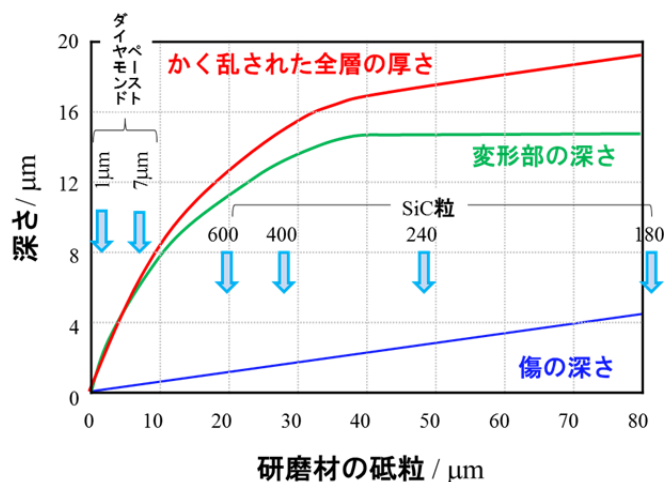


図5 研磨面の傷の深さ、変形部の厚さ、攪乱された全層の厚みと研磨材粒度との関係

研磨で鏡面化した試料は、エッチングを施す前に光学顕微鏡で観察することが肝心です。これはエッチングを施すことで、マイクロクラックやポイドなどが見えにくくなるため、エッチング前後の試料の特徴を把握することがポイントです。エッチングは試料を腐食させる作業ですからエッチング前に試料を十分に洗浄し、不純物を取り除かなければなりません。なおここで言う腐食とは、決して錆（金属の酸化により生成する金属水酸化物）を作るような強い腐食ではなく、粒界や析出物が表出する程度の弱い腐食で、その条件を適切に選ぶ必要があります。エッチング液は代表的な金属についてはデータブックなどに記載されていますが、新合金の場合には、エッチング条件が既知の、組成に近い合金を参考にします。一つの考え方として、水素よりイオン化傾向の大きい金属の場合は酸でエッチングを行いますが、水素より小さい金属の場合は酸では溶解しませんから酸化剤でエッチングさせます。表1は代表的な金属のマイクロエッチングの一例です。エッチング液にはフッ酸

表1 ミクロエッチングの一例

金属	腐食液	時間	注意事項
鉄鋼材料	5%硝酸エタノール溶液（ナイトル）	数秒～数分	洗浄はアルコール使用
チタン合金	10%フッ酸+40%硝酸 水溶液	5~8秒	フッ酸取扱注意
アルミニウム合金	40%フッ酸 水溶液	10~60秒	フッ酸取扱注意
銅合金	20%塩酸エタノール溶液+ 数g塩化第二鉄	数秒~数分	時間は合金元素に依存

のような危険物を使用することがありますから、その場合には防護用手袋や眼鏡を装着し、耐フッ酸用のピンセットやビーカーを使用しなければなりません。またエッチングにより水素等のガスが発生することがありますから、排気ドラフトの中で行う必要があります（場合によってはスクラバー付のドラフトが必要です）、エッチング液の廃液処理も法に準じて行わなければなりません。

実際の切出試料は樹脂に埋め込んで研磨工程に供する 경우가ほとんどです。埋め込み樹脂を使用する場合には、加熱加圧法と常温硬化法があります。前者は専用の埋込機のシリンダー容器内に試料を静置し、150℃前後で樹脂を加圧注入するため、試料は熱の影響を受けます。そして樹脂は不透明な熱硬化型と透明な熱可塑型があり、冷却時間や加熱温度が両者で異なります。埋め込み樹脂を使用する利点は研磨が行いやすいことですが、樹脂は金属に比べて軟らかいため自動研磨装置を用いて高速に研磨すると、樹脂が先行して摩耗され、試料が健全に研磨されないことがありますので注意が必要です。また、バフ研磨後に pH を調整した弱い腐食作用のある液中に 40 nm 程度のサイズのコロイダルシルカを分散させた懸濁液を用いて研磨することで、研磨と弱いエッチングを同時に行う方法も広く用いられています。この方法を用いると、オーバーエッチングによる再研磨の問題が解消しますが、エッチングコントラストは弱くなります。

#### 4 光学顕微鏡

観察用試料が完成したら、いよいよ組織観察です。一般的に組織観察を行う光学顕微鏡の最高倍率は1000倍ですから、見分けることのできる最小のサイズ（「分解能」と称します）は0.2 μm程度です。従ってそれより小さいサイズで観察したいときは、走査型電子顕微鏡や透過電子顕微鏡などの電子顕微鏡を使用します。図6は筆者の研究室で使用している光学顕微鏡で、レンズ（対物と接眼）・光源・絞り・ステージ・フレーム等の基本部から構成されます。組織観察で重要なのはレンズで、倍率を変えるということはレンズを変えることにほかなりません。試料を微細に観察するには、光学顕微鏡の光路に多くの光を取り入れなければなりません。その役割を担うのが対物レンズで、多量の光を取り込むことができれば高い分解能を得ることができます。対物レンズが光を集めることのできる範囲を「開口数」と称し、大きいほど光を集めることができ、分解能は向上します。図7（上）はレンズの模式図ですがレンズ端と試料中心を結ぶ円錐角を $2\alpha$ とすると、図7（下）の様に、 $\alpha$ が大きいほど（一番左）、青線が交わる上側の二個の緑丸（試料の左右端に対応）は分離しますが、 $\alpha$ が小さいと（一番右）、青線が交わる上側の二個の緑丸は重なり分離できません。開口数 $a$ は $\alpha$ と、試料とレンズ間の媒質（通常は空気1.0）の屈折率 $n$ を用いて(1)式で、その時の分解能 $\varepsilon$ は波長 $\lambda$ を用い(2)式で表すことができます。

$$a = n \cdot \sin \alpha \dots\dots(1)$$

$$\varepsilon \approx 0.61\lambda / a \dots\dots(2)$$



図6 光学顕微鏡

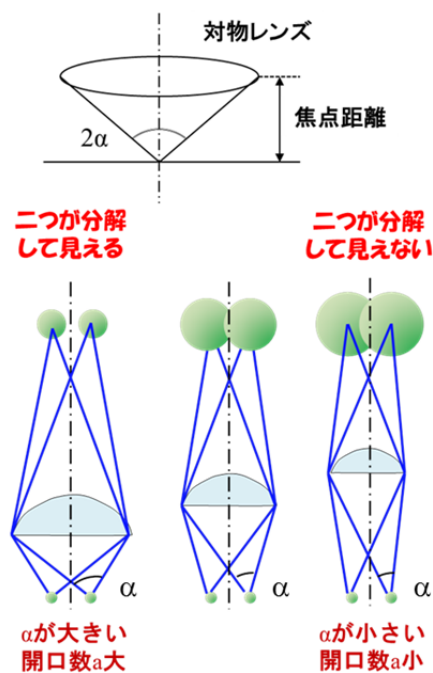


図7 対物レンズの開口数と円錐角

一方、倍率は試料サイズに対する中間像（倒立の実像）サイズの比率で定義されます。図8は光学顕微鏡の光路図ですが、観察対象の試料（AB）は対物レンズを通すと上下がさかさまになり倒立像（A'B'）となります。この倒立像は接眼レンズを通して視ると倒立した像が拡大されてA''B''のように観察できます。結像レンズの焦点距離（図では160 mm）と対物レンズの焦点距離  $f_0$  の比（すなわち AB と A'B' の比）は対物レンズの倍率で、A'B' と A''B'' の比は接眼レンズの倍率ですから、AB と A''B'' の比である倍率は、対物レンズの倍率と接眼レンズの倍率の乗算となります。一般に、光学顕微鏡は接眼レンズを交換するのではなく、図6のように対物レンズをレボルバー機能で交換して、観察の倍率を変えます。

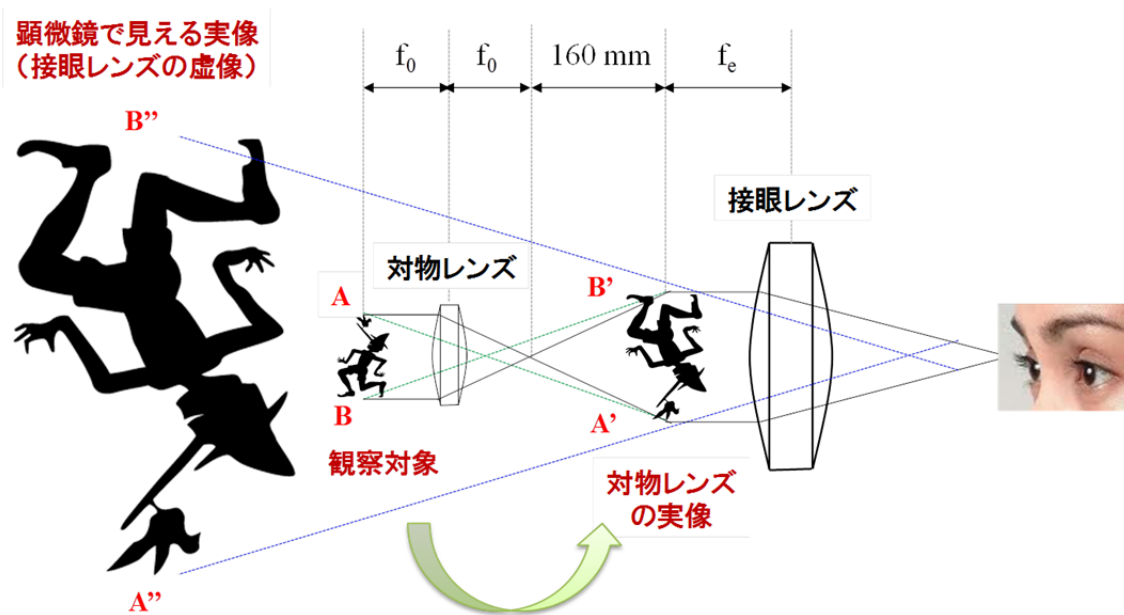


図8 光学顕微鏡の光路

組織観察を行う上で、覚えておきたいのが焦点深度です。焦点深度とは試料を観察する時にピントが合っている最適の位置から、対物レンズと試料面との距離を変えても、ピントがシャープに合っている範囲のことです。焦点深度が深いと、厚みのある試料でも全体にピントが合ってはっきり見えますが、焦点深度が浅いとピントの合う範囲が狭くなり、試料にピントを合わせるのが難しくなります。焦点深度は対物レンズの開口数  $a$  と総合倍率  $M$  に逆比例し、開口数と倍率が大きくなると焦点深度が浅くなります。眼の分解能を  $\omega$  とすると、肉眼で観察する場合の焦点深度  $D$  ( $\mu\text{m}$ ) は(3)式で表すことができます。

$$D = n \cdot \left( \frac{25000 \cdot \omega}{M \cdot a} + \frac{\lambda}{2a^2} \right) \dots \dots (3)$$

## 5. 走査型電子顕微鏡

光学顕微鏡の分解能は  $0.2 \mu\text{m}$  程度で、それより小さなサイズの組織観察には、光の波長よりも短い波長の電子線を使用します。走査型電子顕微鏡 (Scanning Electron Microscope、SEM と称します) の分解能  $\lambda$  は加速電圧  $V$  に依存し(4)式で表せます。

$$\lambda = \sqrt{\frac{150}{V}} \dots\dots(4)$$

図9にSEMの構造の略図を示します。

SEMでは試料を  $10^{-3}\text{Pa}$  より高真空に排気したチャンバー内で、ホルダーに固定して設置します。フィラメント(電子銃)に高電圧を印加すると、電子が発せられ(一次電子と称します)、集束レンズと対物レンズにより試料表面に絞って照射されます。細く絞った電子線は走査コイルにより試料表面を走査(scan)され、試料から二次電子や反射電子が発生し、像を得ることができます。二次電子とは、電子が試料に衝突したときに試料表面から放出される電子で、エネルギーが  $50 \text{ eV}$  未満と小さいため、試料表面の凹凸や形態の観察に使用されます。一方、反射電子は一次電子が試料表面で反射した電子(後方に反射散乱します)で、試料を構成する元素により発生量が異なります。原子番号が大きいほど発生量が多くなるため像は明るくなり、逆に原子番号が小さい原子は発生量が少ないために暗くなります。この特性を利用して反射電子像のコントラストから構成元素の分布を推測することができます。図10は銅合金中のニッケル析出物ですが、(a)の二次電子像ではコントラストがはっきりしません

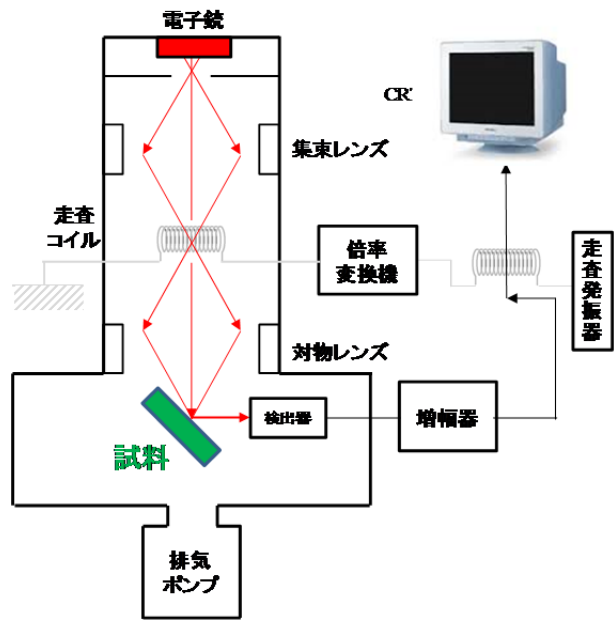


図9 走査型電子顕微鏡の構造

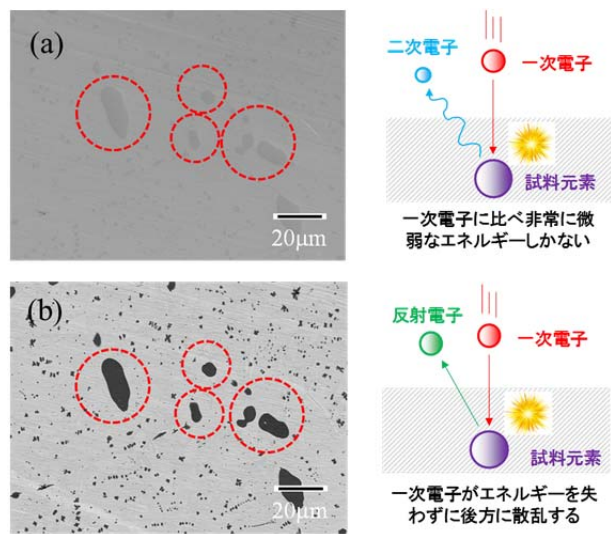


図10 銅合金の二次電子像(a)と反射電子像(b)



が、(b)の反射電子像では、原子番号の大きい母相の銅が明るく、原子番号の小さいニッケル析出物が暗く観察できます。SEMの特徴は、焦点深度が光学顕微鏡に比べて二桁以上深いため、広範囲にピントが合った立体像を得ることができることです。しかし、電子線は試料表面から内部に深く進入するため、表面近傍の情報が失われます。また、加速電圧を高くすると、電子線による試料加熱や帯電が起こりやすくなり、耐熱性に劣る試料や帯電しやすい試料は加速電圧を低くします。一方、試料を低真空状態で観察することで、帯電が軽減されるため、酸化物などの非導電性試料の観察が可能となり、ガス放出の多い試料や低蒸気圧試料の観察に用いられます。

こうした特徴を活かし、様々な金属や酸化物のSEMによる電子像を図11に示します。(a)は平均粒径90  $\mu\text{m}$ のFe-40 at.% Al粒子を500 TorrのAr雰囲気内でステンレス基板にプラズマ溶射した溶射材の表面組織で、粒子が基板に高速衝突して変形して堆積している様相が観察できます。(b)は純Tiの熱延材で表面凹凸が観察でき、別途行った分析からチタン酸化層が不均一に生成していることが明らかとなりました。(c)はステンレスにレーザーを照射した後の組織で、表面凹凸が大きいだけでなく、一部微細なクラックを観察することができます。(d)はMo-ZrCの共晶合金の組織ですが、MoとZrCが層状に積層していることが判ります。(e)は純Ti上に硫酸電解浴で生成した陽極酸化TiO<sub>2</sub>材で表面がサブミクロンサイズの多孔質構造になっています。そして(f)は(e)の試料を疑似体液に48時間浸漬後に生成した後に生成したハイドロキシアパタイト(リン酸カルシウム)で、脆性のためクラックを観察できます。SEMを用いた組織観察は、分解能が高だけでなく、表面形状を観察するのに有効ですから、三次元的な観察に役立つ手法です。

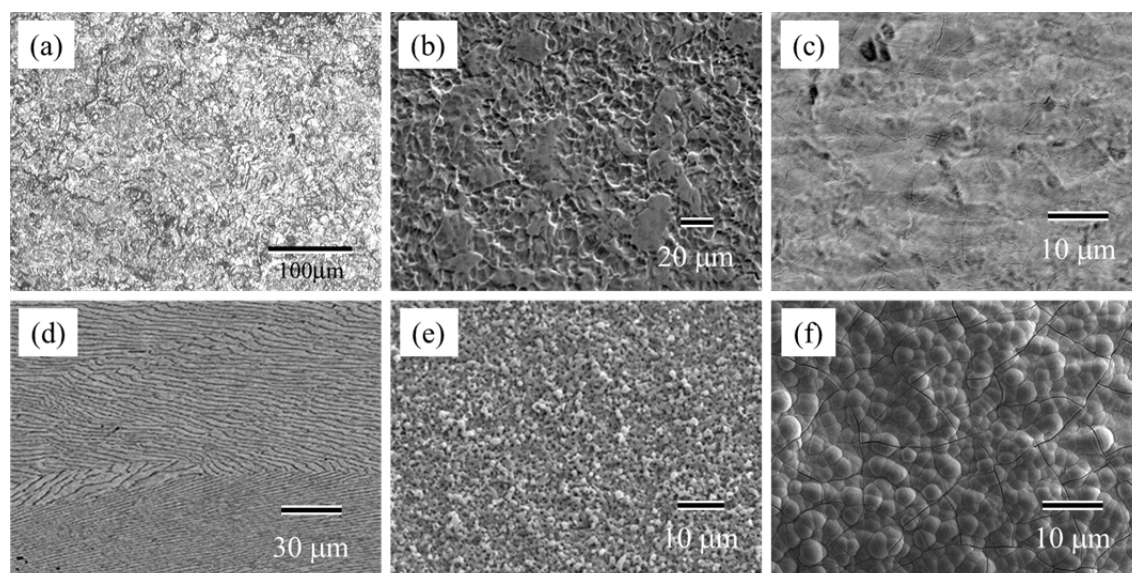


図11 様々な材料のSEM画像:(a)FeAl粒子溶射材、(b)Ti熱延材、(c)ステンレスレーザー照射材、(d)Mo-ZrC共晶材、(e)陽極酸化TiO<sub>2</sub>材、(f)ハイドロキシアパタイト

## 6. 透過型電子顕微鏡

透過型電子顕微鏡 (Transmission Electron Microscope、TEM と称します) 観察とは、電子銃から発生した電子を試料にあてて透過した電子線の強弱から、試料内の電子透過率の分布を観察する方法です。電子の透過密度は試料の結晶構造や成分元素に依存し、これが観察像となります。電子が試料を透過するためには、試料を出来るだけ薄くしなければなりません (通常は 100 nm より薄くします)。走査電子顕微鏡と同様に分解能は加速電圧に依存し、(4)式のように表せます。図 12 に TEM の構造を模式的に示します。電子銃から放出された電子は加速管で加速され、集束レンズと収束絞りを通過して、試料にあたります。試料を透過した電子線は中間レンズ等で拡大し、電子線によって光る蛍光板にあたり組織観察が可能となります。SEM は立体的に観察出来るのに対し、TEM は基本的には二次元的な観察となります。電子は試料を透過して像を作りますので試料内部の情報を得ることができますが、SEM では内部情報は判りません。さて、厚み 100 nm 以下の薄い試料はどのように作成するのでしょうか。図 13 は薄膜試料作製に多用されるイオンミリングの模式図です。約 100  $\mu\text{m}$  以下に調整した薄片試料の中央をデンプルグラインダーにより凹み加工を施し、回転ステージに載せ、試料を回転させながら、不活性ガス (通常は Ar) を加速電圧数 kV で、低角度 (数~20 度) で表裏から照射して削ります。また、最近多用される作製方法が、図 14 の集束イオンビーム(Focused Ion Beam)法です。高電圧で加速した Ga イオンビームを薄片試料 (上の写真) の側面 (写真の上から) 上に照射して、スパッタリングにより試料を薄くし (下の図)、所望の箇所をサンプリングできるという利点があります。

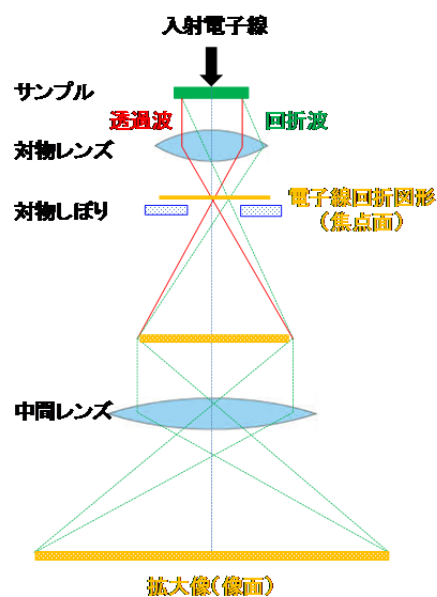


図 12 透過型電子顕微鏡の構造

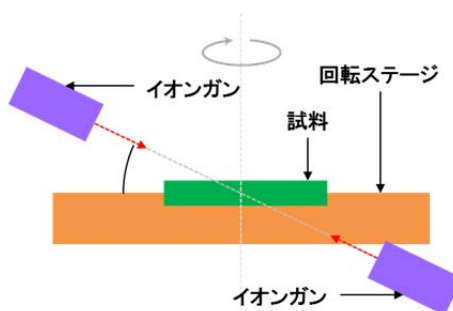


図 13 イオンミリング研磨の模式図

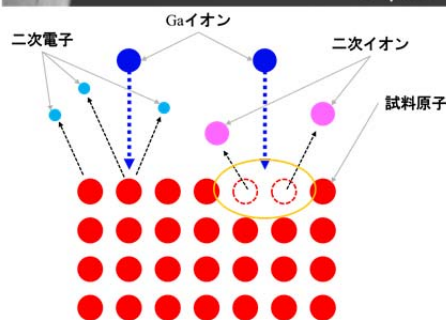
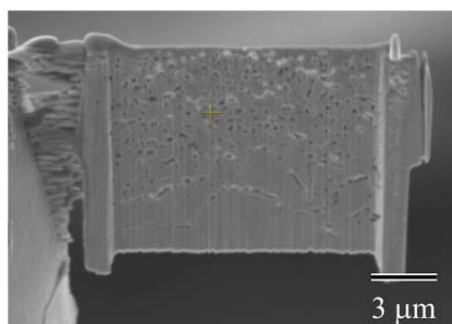


図 14 FIB 研磨の模式図

TEM は上記のように薄膜化する必要があることに加え、SEM よりも高い加速電圧で試料に電子線を照射するため、試料への損傷にも気を配る必要があります。一方、加速電圧を高めることで、理論的には原子サイズより小さい分解能を得ることができます。電子の波長 $\lambda$ は、真空中の速度 $v$ 、電子質量 $m$ 、プランク定数 $h$ 、加速電圧 $V$ を用いると、(5)と(6)式が成立しますから、電子線の波長 $\lambda$ は(7)式となります。(2)式に(7)式を代入すると、分解能 $\epsilon$ は(8)式で表すことができます。

$$\lambda = \frac{h}{m \cdot v} \dots\dots(5) \quad e \cdot V = \frac{1}{2} m \cdot v^2 \dots\dots(6) \quad \therefore \lambda = \frac{1.23}{\sqrt{V}} \dots\dots(7)$$

$$\epsilon \approx \frac{0.753}{n \cdot \sin \alpha \cdot \sqrt{V}} \approx \frac{0.753}{n \cdot \alpha \cdot \sqrt{V}} \dots\dots(8)$$

屈折率 $n$ は1、 $\alpha$ は約 $10^{-2}$  rad ですから、 $V=100\text{kV}$  で $\epsilon=0.24 \text{ nm}$  となります。しかし、レンズには収差と称する一種の歪みがあり、この値にはなりません。電子顕微鏡のレンズは磁界により形成（凸レンズとしての役割しかない）するため補正には限界があり、凹レンズとの複合レンズで収差補正をする光学顕微鏡とは異なります。電子顕微鏡の分解能は加速電圧を高めることで、現在は $0.1 \text{ nm}$  程度とされています。

図 15 は Ti 合金基板に陽極酸化法で成膜した  $\text{TiO}_2$  を FIB 法で薄膜化し、TEM で観察した組織です。左の二枚の写真から結晶粒界が観察でき、左下の HAADF (High-angle Annular Dark Field Scanning) 像の黄色線枠の部分を拡大した右の写真から、左右方向に線上の濃淡コントラストが認められます。HAADF 像では重い元素は暗く、軽い元素は明るくなるため、原子の配列を推察することができます。

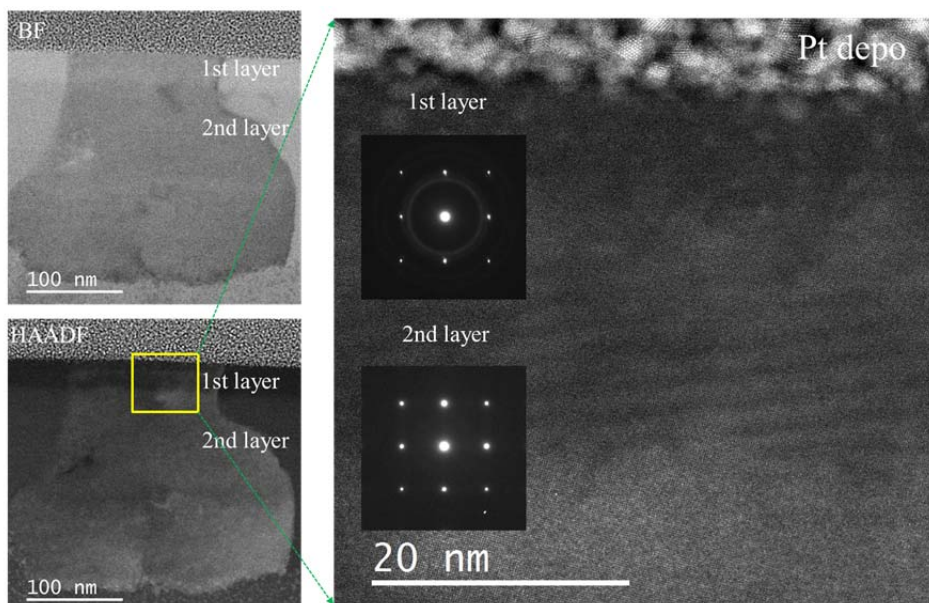


図 15 FIB で作製した陽極酸化  $\text{TiO}_2$  膜の電子顕微鏡象

## 7. 様々な組織観察手法

観察法には、他にも、共焦点レーザー顕微鏡、走査プローブ顕微鏡、蛍光顕微鏡など様々な方法があります。共焦点レーザー顕微鏡（Confocal laser scanning microscopy、CLSM と称します）はレーザー光を光源に、焦点距離が異なる凹凸の大きい試料を場所ごとに焦点を合わせて結像するため、全体の焦点があった像ができます。図 16 は図 15 の陽極酸化法で成膜した  $\text{TiO}_2$  を疑似体液に 96 時間浸漬前後のレーザー顕微鏡像で、その SEM 像は図 11 の(e)と(f)に対応します。浸漬前の  $\text{TiO}_2$  の平均表面粗さは  $1.74 \mu\text{m}$  ですが浸漬後は  $1.91 \mu\text{m}$  と増加し、別途行った解析から粗さ増加はハイドロキシアパタイト生成によることが判りました。

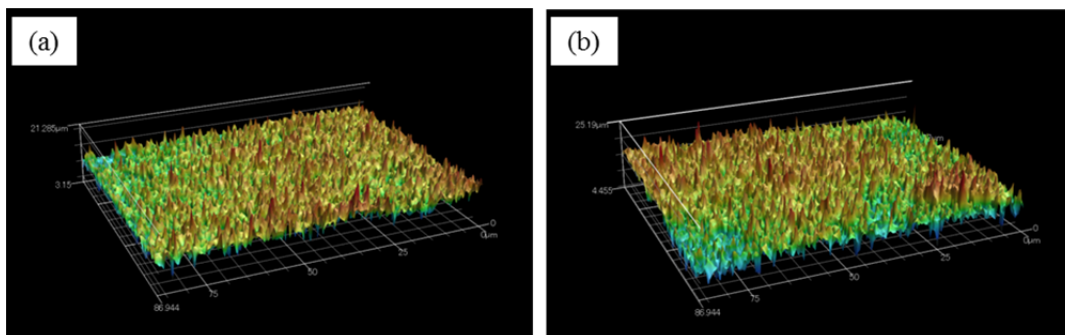


図 16 陽極酸化  $\text{TiO}_2$  材(a)と疑似体液に浸漬後(b)のレーザー顕微鏡像

一方、走査形プローブ顕微鏡（Scanning Probe Microscope、SPM と称します）は、走査形トンネル顕微鏡（Scanning Tunneling Microscope、STM と称します）と原子間力顕微鏡（Atomic Force Microscope、AFM と称します）に大別できます。STM の試料は導電体に限られ、AFM は導電性の無い試料も観察できます。STM は先端のものがったプローブで試料表面をスキャンし、プローブと試料間に流れる微小電流（「トンネル電流」と称します）変化から表面凹凸を計測し、形状を結像します。AFM はトンネル電流ではなく原子間力を用いて結像するため、試料に導電性は必要ありません。CLSM と同様、表面形状の凹凸を数値情報として記録することができます。図 17 はデバイスに使用する Al 配線の As-sputter (a)と酸化熱処理後(b)の AFM 像ですが、表面の形状がクリアに観察でき、熱処理により酸化膜の形成をうかがえます。

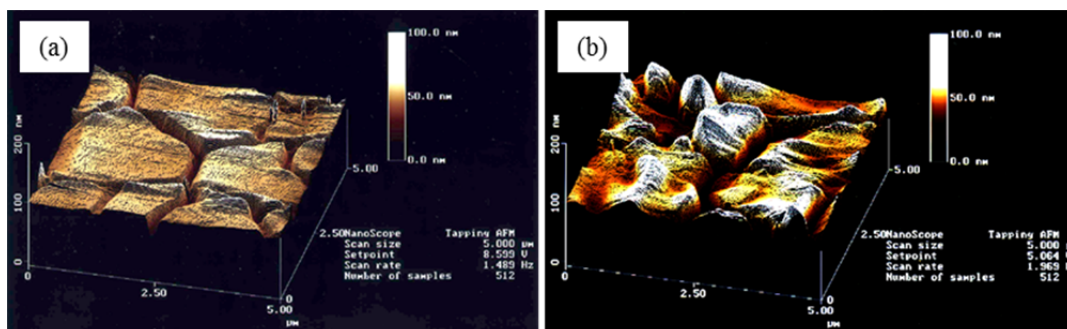


図 17 Al 配線の As-sputter AFM 像(a)と酸化熱処理後の AFM 像(b)

## 8. おわりに

最後に、光学顕微鏡の歴史を紹介して本項を閉じます。顕微鏡は1590年頃オランダの眼鏡職人ヤンセンが発明したと言われています。1658年にオランダのスワンメルダムが、ガラス玉を研磨して作製した虫眼鏡で昆虫の解剖組織を観察したのが「組織観察」の始まりと考えられています。図17(a)は、1660年にイギリスのフックが製作した顕微鏡で観察したコルクの細胞模式図で、その後Cell（細胞）の発見に繋がりました。また(b)は、同時期にオランダのレーベンフックが作製した顕微鏡で、バクテリアや赤血球等を観察しました。しかし、これらの単体レンズでは像の歪み（収差）の補正ができないため、微細な組織の観察は困難でした。1729年にイギリスのホールが、色収差を解消するレンズを作り、1830年にイギリスのリスターがこのレンズの開口数を大きくすることで高倍率の像を得ることに成功しました。ただ、当時のレンズは職人の経験と勘で製造されていたため、安定な供給には至りませんでした。1846年にドイツのカール・ツァイスが光学器械会社を設立し、ツァイスの要請で収差解消を研究していたエルンスト・アッペが1872年に数学的な結像理論を提唱し、レンズ製造を始めました。アッペは1886年にオットー・ショットと共に、色収差を改善したガラスからできた対物レンズを作り、ツァイス社と光学ガラス研究所を設立しました。その後、接眼レンズとの組み合わせで、さらに収差が補正され、現在の顕微鏡の原型である光学顕微鏡（図17(c)）が完成しました。以上の様に光学顕微鏡の実現はレンズの開発の歴史そのもので、この技術は、その後、メガネや望遠鏡、写真など多くの分野で利用されることとなりました。

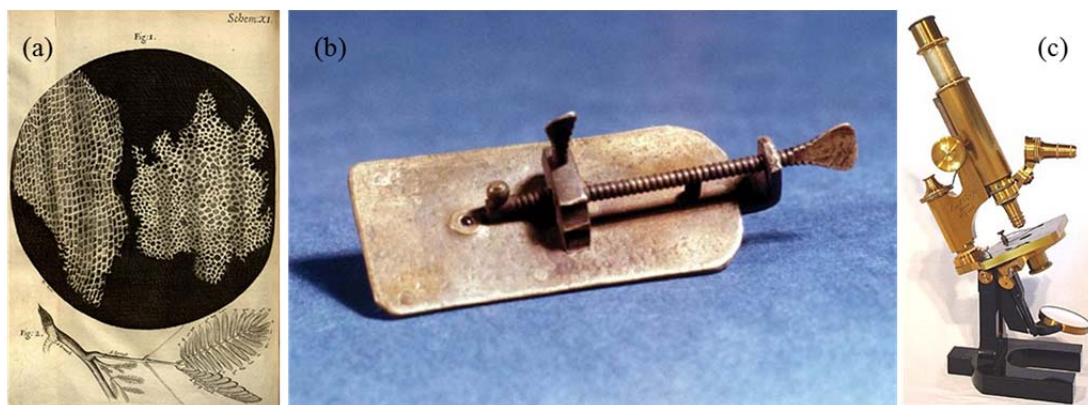


図17 フックのコルク細胞組織図(a)、レーベンフックの顕微鏡(b)、ツァイスによる顕微鏡(c)。

本項では「組織観察」の概要を紹介しましたが、紙面の都合で詳細な記述はできませんでした。本稿を通して読者の皆さんが組織観察について少しでも理解を深めてくれることを期待します。