

材料・プロセスと機械設計の関係

図1に材料・加工プロセスと機械設計（機能・形状）の関係を示す。製品の原材料となる材料を起点に、製品開発目標に従って必要となる機能を抽出、この機能を実現する形状を加工プロセスも考慮して、材料・加工プロセスの選定を行う。これが Ashby 法の提唱する機械設計方法でこの際に Ashby マップが設計を支援する。一方、実際の機械設計はより複雑かつ多様であり、材料・加工プロセスそのものから新たな機能を閃き、製品へと結びつく場合も少なくない。従って、設計を行う際に製品を具現化する材料・加工プロセスを十分に理解、最新の材料・加工プロセス情報を知っておくことは不可欠である。

図2に椅子を例とした材料・加工プロセスマトリクス（製品を構成する材料と加工プロセスをマトリクスで表現したもの）を示す。これから、材料が決まると加工プロセスもある程度限定されること、逆に加工プロセスが決まると適用可能な材料も限定されることが分かる。このように、材料と加工プロセスは密接な関係にある。製品化においてコストは最重要課題の一つであるが、いくら安い材料を用いても加工プロセスの費用が掛かっては意味がない。材料・加工プロセスを一体と考えた設計が必要となる。図2の場合は設計者に製品のイメージ（形状）があり、これを具現化する材料・加工プロセスを選定しているように見える。多くの製品設計は既存の製品をベースに考えることが多いので問題はないが、他社との差別化という観点からは他の方法も時として必要となる。そのような場合には、材料・加工プロセスマトリクスを可能な限り広い領域で作成し、このマトリクスから新たな製品コンセプトを考えるのも一つの方法である。

図1で製品開発目標に従って必要となる機能を抽出すると言ったが、機能にはいくつかの側面がある。荷重を支える、熱を伝える／伝えない、電気を伝える／伝えないと言った物理現象を基本とした機能が狭義の機能である。一方、製品を顧客視点で観察すると図3に示すように、視て（観察して）、触って（手に取って）、聴いて（使って）というプロセスで製品の購入判断を下す。すなわち、優先順位としては視る＞触る＞聴く（オーディオ機器の場合）となる。もちろん、最終段階で聴いてよくなければ購入しないが、それ以前に見た目が悪かったり、触感に違和感があったりすれば購入には繋がらない。これは聴くという機能は重要ではあるがこれと同じ位（場合によってはこれ以上に）、美（Aesthetic）、触（Material）も重要ということの意味する。そこで、ここでは機能を美、触、機能/構造から構成されるものとして広義に考える。美は形状だけでなく、質感、色が関係するし、触には材料の伝熱特性、剛性/硬さ、表面粗さ、摩擦が関係する。これらの多くは材料そのものだけでなく加工プロセスにも左右される。以上より、Ashby 法による機械設計においては美、触、機能/構造を設計の3要素とする。ここに、構造とは製品を形状視点で捉えたものと定義する。

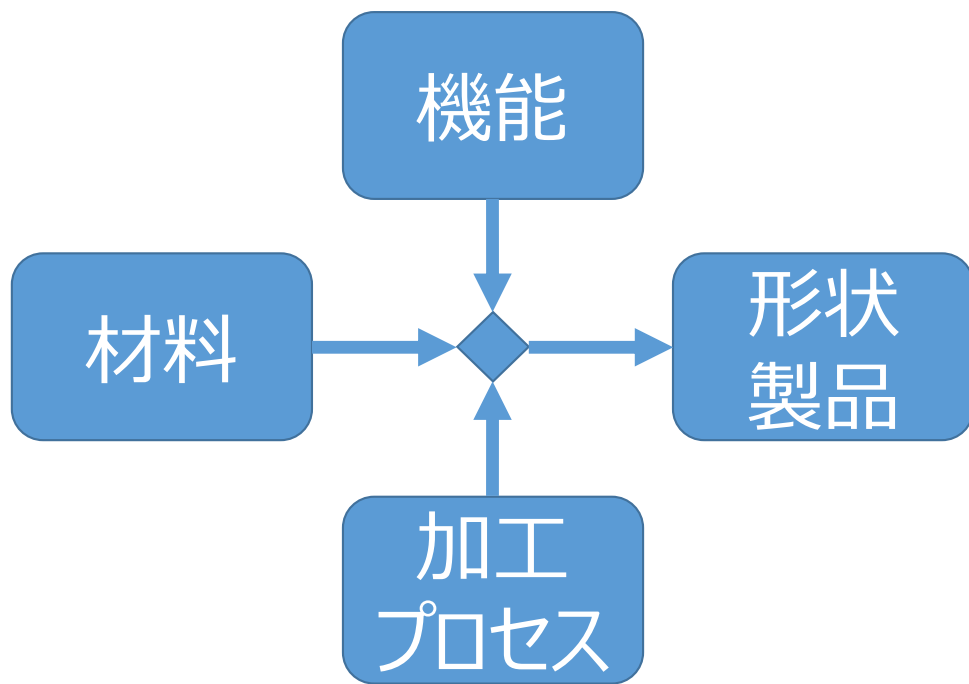
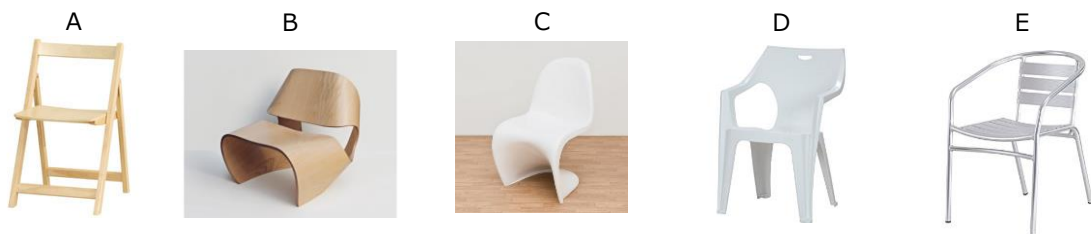


図1 材料・加工プロセスと機械設計（機能・形状）の関係



		加工プロセス					
		機械加工	シート成形	引抜	回転成形	レイアップ法	熱成形
材料	木	A					
	合板					B	
	ABS				D		C
	ステンレス		E	E			

図2 材料・加工プロセスマトリクス（椅子の場合）

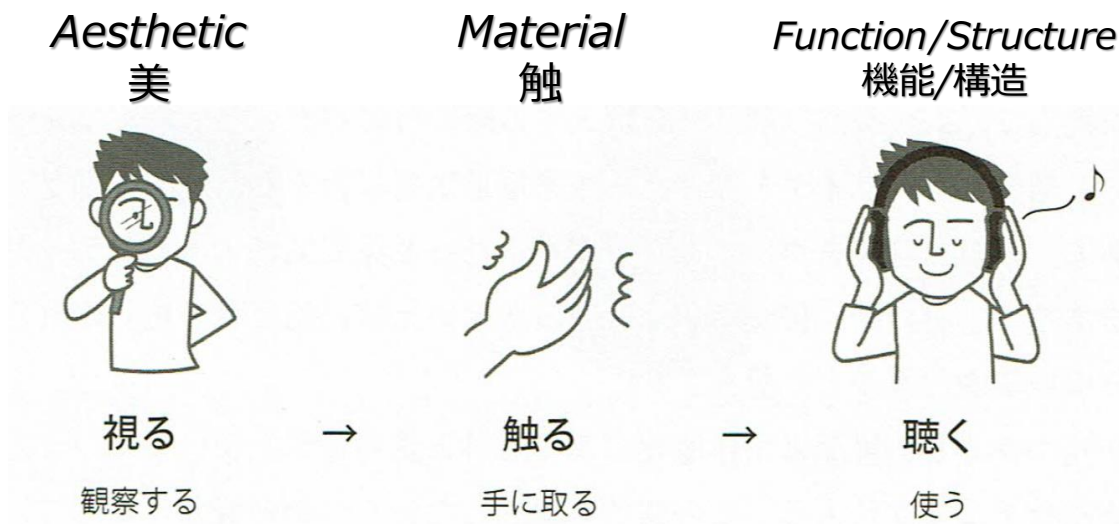


図3 設計の3要素

材料の分類

材料を Ashby 先生の著書⁽¹⁾に従って、図4のように分類する。大きく金属、ポリマー（高分子有機物）、セラミックス（無機物焼結体）、複合材（異なる材料を一体化）、その他に分類できる。

金属は一般に鉄と非鉄金属に分類される。鉄はさらに鑄鉄、炭素鋼、ステンレス鋼に分けられる。鑄鉄は鑄物に使用される材料で、鉄以外に、炭素(C) 2.14-6.67% ケイ素(Si) 1-3% を含有する。炭素鋼は炭素(C)の含有率により、低炭素鋼（炭素(C) 0.25%以下）、中炭素鋼（0.25-0.6%）、高炭素鋼（0.6%以上）に分けられる。ステンレス鋼はクロム(Cr)を 10.5%以上含有し、錆びにくいことを特徴とする。鉄は一般には鉄鉱石から、銑鉄を取出し、精錬、製鋼の各工程を経て所定の材料となる。

非鉄材料は、アルミニウム合金、銅合金、金、銀、錫、鉛合金、マグネシウム合金、ニッケル合金、チタン合金、タングステン合金、亜鉛合金を対象とし、一部の材料は材料そのものを使用するが多くの材料は他の元素を適宜含有した合金として使用される。アルミニウムはボーキサイトを原材料とし、アルミナ、アルミニウムへと精錬される。アルミニウムの製造工程では多量の電力を使用するため、アルミ缶の再利用が重要である。

ポリマーは熱可塑性（熱を加えると柔らかくなる）、熱硬化性（熱を加えると硬くなる）、エラストマー（ゴム弾性を有する）に分類される。熱可塑性ポリマーとしては、ABS、ナイロン、ポリカーボネート、ポリエチレン、PET、アクリル、ポリプロピレン、ポリスチレン、テフロン(PTFE)、ポロウレタン、ポリ塩化ビニル、熱硬化性ポリマーとしては、エポキシ、ポロエステル、エラストマーとしては、ブチルゴム、エチレンビニルアセテート、天然ゴム、ネオプレン、シリコンエラストマーがある。新たな材料が日々生まれている分野である。

セラミックスは非工業用（自然界に存在する）と工業用（人工的に作成する）に分類できる。非工業用セラミックスとしては、セメント、コンクリート、煉瓦、鉱物、石、工業用セラミックスとしては、アルミナ、窒化アルミニウム、シリコン、炭化ケイ素、タングステンカーバイドがある。工業用セラミックスは半導体、電子機器の基板に使用されている重要な材料の一つである。

複合材の代表はCFRP（炭素繊維強化プラスチック, Carbon Fiber Reinforced Plastics）とGFRP（ガラス繊維強化プラスチック, Glass Fiber Reinforced Plastics）でいずれもプラスチック（樹脂）を炭素繊維またはガラス繊維で強化した材料である。

その他の材料として、ガラス（ホウケイ酸ガラス、シリカガラス、ソーダ石灰ガラス）、発泡材（ポリマーフォーム）、天然素材（竹、木、コルク、皮革、紙、段ボール）がある。

上記いずれの材料も特徴を有しており（もちろん欠点もあり）、これを利用して多くの製品に適材適所で適用されている。

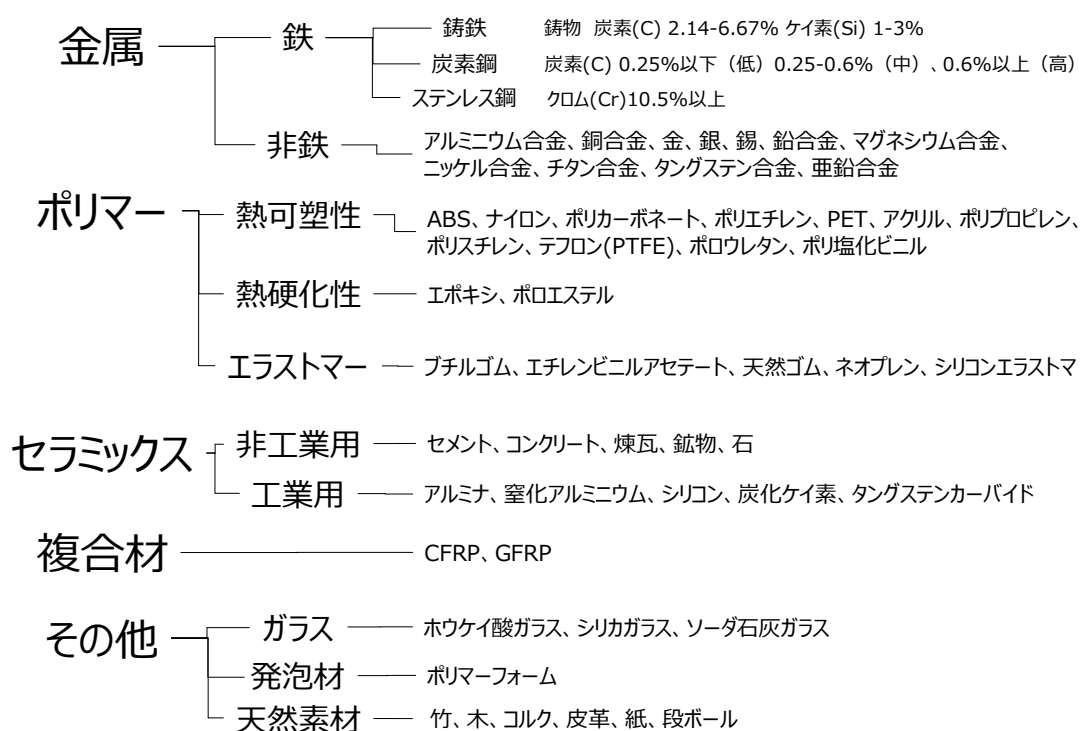


図4 材料の分類

加工プロセスの分類

図5に加工プロセスの分類例を示す。材料（素材）は一次成形により最終形状に近いラフな形状に変換される。二次プロセスでは細かな加工、処理を施す。接合では複数の部品を一体化する。また、表面処理では最終の表面処理を行う。このようにして材料は製品へ

と変換される。以下、各加工プロセスの方法について述べる。

一次成形

一次成形は対象とする材料、欲しい形状に応じて鋳造 (Casting)、成形 (Molding)、圧延 (Rolling)、3D プリンタ (AM: Additive Manufacturing) に分類される。

鋳造は型に溶融した材料を注入して形状を得る方法である。ダイカスト (Die casting)、砂型鋳造 (Sand casting)、インベストメント鋳造 (Investment casting)、樹脂キャスト (Resin casting) などの方法がある。ダイカストは金型に溶融した金属を圧入することにより、高い寸法精度の鋳物を短時間に大量に生産する鋳造方式である。砂型鋳造は砂で作った型に溶融金属を流し込み成型する鋳造法で、紀元前 4000 年頃から、日用品・武器・仏像などに適用されていたが、現代においても機械部品など様々な製品に適用されている。インベストメント鋳造は工業プロセスにおける鋳造方法のひとつで複雑な形状の製品を簡易に製造できる。ワックス (蝋) や発泡スチロールのように高温で消失する素材で原型を製作する。ワックス (蝋) を使用する場合にはロストワックス鋳造 (Lost wax casting) とも呼ばれる。樹脂キャストは工業デザイン試作や歯科技工などの分野で用いられる、少量生産向けの合成樹脂の成型方法である。一般にはゴム製の型に樹脂と硬化剤を混ぜたものを注入して形状を生成する。レジンキャストとも呼ばれ、常温鋳造法 (コールドキャスト) の一つである。

成形はプラスチックなどの樹脂を素材とした成型方法で、射出成形 (Injection molding)、回転成形 (Rotational molding)、ブロー成形 (Blow molding)、膨張発泡成形 (Expanded foam molding)、圧縮成形 (Compression molding)、樹脂トランスファー成形 (Resin transfer molding) などの方法がある。射出成形はプラスチックなどの加工法で、熱可塑性樹脂の場合が典型的で、粒状のポリマーを軟化する温度に加熱し、高圧を加えて金型に押し込み、型に充填して成形する。回転成形は中空製品を生産する成形方法のひとつで、型に原料 (粉) を注入、型を回転・加熱した後、冷却して製品を取り出す。小ロット・多品種を得意とし、大きなものや意匠性の自由度が高いものまで、少額の金型投資で製品化できることから、近年改めて注目されている成形方法である。ブロー成形は中空成形、吹込み成形とも呼ばれ、プラスチックの加工法の一つでペットボトルやポリタンクなど、中空の製品を作るのに用いられる。分割型に中空材料 (一般にはパイプ状) を挿入、分割型を合わせた後中空材料に高圧ガスを注入して成形する。膨張発泡成形は発泡スチロールの成型方法で、小さい穴 (直径 1mm 程度) を有する分割型に素材となるポリスチレンのビーズを充填、蒸気で発泡させた後、型を分割して発泡体を取り出す。圧縮成形は成形材料を加熱した金型の凹部 (キャビティ) に入れ、圧縮成形機で加圧して硬化させる方法である。プラスチック成形方法としては、もっとも歴史のある成形方法で、熱硬化

性樹脂（プラスチック）の代表的な成形方法である。樹脂トランスファー成形はプランジャー内でいったん加熱軟化させた材料を狭い材料の通り道から加熱されたキャビティの中に押し込んで硬化させる方法である。製品の形状や使用されるインサートの種類により、圧縮成形には不向きな製品を成形する際に利用される。より精密な寸法精度が求められる成形品や、コイルやモータの封止に適した成形方法である。

圧延は材料に力を付加して所定の形状にする方法で、圧延（Rolling）、押出（Extrusion）、シート成形（Sheet forming）、鍛造（Forging）、プレス・焼結（Press and sintering）、レイアップ法（Lay-up methods）などがある。圧延は金属の加工方法の一つで、2つあるいは複数のロール（ローラー）を回転させ、その間に金属を通すことによって板・棒・管などの形状に加工する方法である。材料に大きな力を加えて加工する、塑性加工の一種である。押出は同じく塑性加工の一種で、耐圧性の型枠に入れられた素材に高い圧力を加え、一定断面形状のわずかな隙間から押出すことで求める形状に加工する方法である。シート成形はシート状の素材を変形させて、平たく薄い製品を作る方法である。鍛造は金属加工の塑性加工法の一つで、金属を叩いて圧力を加える事で、金属内部の空隙をつぶし、結晶を微細化し、結晶の方向を整えて強度を高めると共に目的の形状に成形である。古くから刃物や武具、金物などの製造技法として用いられてきた。プレス・焼結は粉末を冷間型で圧縮、ある程度の強度を与えた後、焼結して強度を持たせる方法である。レイアップ法は成形型に強化基材をあらかじめ形成させ、人手によって樹脂をハケやローラーで含浸させ、脱泡しながら所定の厚さまで積層する成形法である。

3Dプリンタ（AM）は3D形状を直接空間に形成する方法で、レーザ方式、インクジェット方式、積層方式がある。レーザ方式は液槽の樹脂の表面に部品の断面のパターンの紫外レーザ光を照射して硬化する事によって出来た層を幾重にも積層する事によって立体の造形物を作る技術で、レーザで断面が露光され、硬化した層は順番に重ねられる作業が繰り返され、立体物を形成する。インクジェット方式は液化した材料またはバインダを噴射して積層させ、形状を作る造形法で、インクジェットプリンターの原理を応用、ワックスを噴射する。材料の無駄が少なく、比較的精密なものを作るために適する。積層方式はワイヤ状の熱可塑性樹脂を高温で溶かし積層させることで立体形状を作成する造形法で、ABS樹脂、ポリカーボネート樹脂、ポリエーテルイミドなど熱可塑性の様々なプラスチックが使用できる。

二次プロセス

二次プロセスとしては機械加工（Machining）、熱処理（Heat treatment）がある。

機械加工はさらに切断（Cutting）、掘削（Drilling）、機械加工に分類される。切断は物

体を二つに分断する加工法の総称で。工具としてはさみや刃刃を用いる剪断加工、鋸刃を用いる鋸加工、火炎により被削材を溶かして切断するもの、および微粉末を吹きつけて切断するものが代表的である。掘削は被削材を固定させ、回転するドリルで穴を開ける方法で、開ける穴の形状に応じて、コア掘削、ステップ掘削、深座ぐり、皿座ぐりがあり、それぞれ専用の工具（ドリル）を使用する。機械加工は切削工具や工作機械を用いて素材（機械の部品など）を加工することで、切削加工・研削加工・研磨などさまざまな方法がある。加工に当たっては、旋盤・フライス盤・ボール盤・研磨機・NC 工作機械・マシニングセンタなどの工作機械が使用される。

熱処理は金属（特に低炭素鋼）の加工において、表面層の硬化を目的として炭素を添加する処理のことである。主に耐摩耗性を向上させるために行われる。浸炭は素材を硬化させるための準備であり、硬化そのものは焼入れ・焼戻しにより行う。

接合

接合の方法としては締結（Fasteners）、溶接（Welding）、摩擦溶接（Friction-stir weld）、接着（Adhesive）がある。

締結にはリベット・ステープル（Rivets and staples）、縫製（Sewing）、スナップフィット（Snap fit）、ねじ留め（Threaded fasteners）などの方法がある。リベット・ステープルは2つの材料（主にはシート状の材料）をリベットまたはステープルで締結する方法である。縫製はいわゆる縫物を製作する方法で手縫いであったり、機械縫い（ミシン）であったりする。スナップフィットは金属やプラスチックなどの結合に用いられる機械的接合法で、材料の弾性変形を利用してはめ込むことにより締結する方法である。ねじ留めは文字通りねじで締結する方法で、ボルトとナットを用いる方法が一般的である。

溶接は複数の部材の接合部に熱（場合によっては溶加材）を加えて結合する方法で熱の加え方、溶加材の種類により種々の方法がある。ろう付け（Brazing）は接合する部材（母材）よりも融点の低い合金（ろう）を溶かして一種の接着剤として用いる事により、母材自体を溶融させずに複数の部材を接合させるほうほうである。ろう付けには銀の合金である銀ろうが多用されている。似た方法に電気機器の配線等を接合するのに利用されるはんだ付け（Soldering）がある。はんだは鉛とスズを主成分とした合金である。アーク溶接は放電現象を利用した同一金属を結合する方法である。ガス金属アーク（MIG）、ガスタングステンアーク（TIG）、手動金属アーク（MMA）などがある。その他に、真空中にて高温に加熱したフィラメントから放出される熱電子を、高電圧で加速させ、さらに電磁レンズにより、細く収束させ、これをワークに照射することで、高エネルギー密度の熱源として溶接するパワービーム（Power beam）、被溶接材の金属を重ね合わせ、溶接する個

所を電極で挟み、適当な加圧力を加えて電流を流し、溶接部位の接触抵抗に発生するジュール熱でお互いを溶融接着させる抵抗溶接（Resistance welding）などがある。

摩擦溶接は摩擦熱と圧力にて2つの金属を結合させる加工法である。摩擦によって発熱しながら表面部が外に排出されて接合界面が清浄な状態となる。さらに金属表面同士を高温・高加圧で接する事により原子の拡散が進んで接合する。摩擦熱の与え方は回転の他に超音波を用いる場合もある。

接着はいわゆる接着剤を用いて結合する方法で、柔らかい材料同士を接着するフレキシブル接着剤（Flexible adhesive）、硬い材料同士を接着する剛性接着剤（Rigid adhesive）がある。

表面処理

表面処理の方法には、研磨（Polishing）、金属沈着（Metallizing）、陽極酸化（Anodizing）、塗装（Painting）がある。

研磨には金属表面を化学薬品により溶解し光沢を与え、平滑にする化学研磨（Chemical polishing）、研磨する製品を陽極（プラス側）にして対極となる陰極（マイナス側）との間に電解液を介して直流電流を流すことで電解研磨する電気研磨（Electro-polishing）、化学薬品などの腐食作用を利用したエッチング（Etching）、機械的に表面を研磨する研削・機械研磨（Grinding and mechanical polishing）がある。

金属沈着は鋼材の表面に亜鉛の合金層を形成する方法で、亜鉛の犠牲的防食作用により、鋼材の腐食を抑制する。屋外に設置される鋼構造物の防食処理として広く採用されており、環境条件が良好であれば数十年に渡る防食効果が期待できる。

陽極酸化は電解溶液中で対象物（金属）を陽極として通電させることで、表層に酸化皮膜を成長させる処理方法である。他に、通電による電子ではなく、めっき液に含まれる還元剤の酸化によって放出される電子により、液に含浸することで被めっき物に金属ニッケル皮膜を析出させる無電解めっき（Electroless plating）、めっきしたい物質を含む溶液、溶融塩、または、固体電解質からその物質を還元させ、電導性のある物体にその物質（金属など）の薄い層を形成させる電気めっき（Electroplating）がある。

塗装には、有機溶剤ベースの塗装（Organic solvent-based painting）、水性塗料による塗装（Water-based painting）が代表的である。他に、水圧転写法を用いた印刷技術で、金属やプラスチックなどさまざまな立体素材に絵柄を施すキュービック印刷（Cubic

printing)、専用の機械で加圧、加熱によって金属調の文字、絵柄などを非転写物に転写するホットスタンピング (Hot stamping)、孔版画の技法の一種で、インクが通過する穴とインクが通過しないところを作ることで版画の版を製版、印刷するシルクスクリーン印刷 (Silk screen printing) がある。

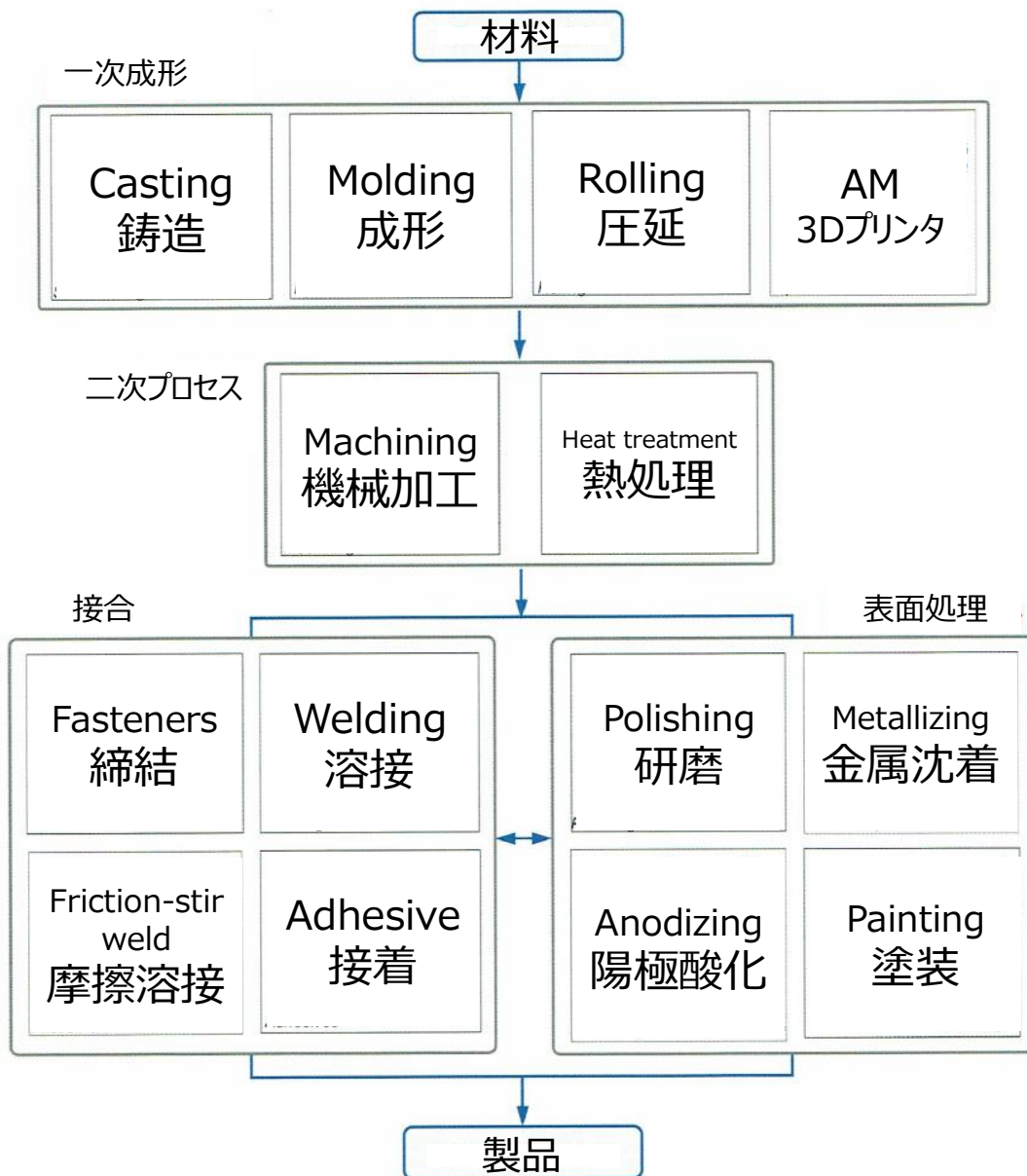


図5 加工プロセスの分類