

Ashby 法の全体像

Ashby 法の全体像を図 1 に示す。出発点となるのは材料・加工プロセスデータ、すなわち、材料物性、エコ属性、感覚属性、接合プロセス属性、表面処理プロセス属性、成型プロセス属性である。これらは連続量、離散量、等様々な形式で表現される。一連の材料・プロセスデータから二つのデータを選択して二次元マップを作成、このマップ上に該当する材料・プロセスをプロットしたのが材料・加工プロセスマップである。また、加工プロセスマップの場合には加工プロセスデータを一軸に、もう一軸に加工プロセスの種類をとる場合もある。一方、設計問題として例えば、軽くて十分な剛性を有する梁を考える。この場合、“軽くて十分な剛性を有する梁”という設計目標において、十分な剛性を有するという制約条件下で質量を目的変数として最小化するという設計問題に置き換えることができる。この設計式は設計指標として、二つの設計変数（材料物性及び材料・プロセス属性）の関数で表現できる。この関係を材料・加工プロセスマップ上にプロットしたのが Ashby マップ(1) である。また、設計指標を複数の設計変数（材料物性及び材料・プロセス属性）の関数で表現、この設計指標を二種類、二次元マップ上に表現したのが Ashby マップ(2) である。さらに、この二種類の設計指標間の関係を Ashby マップ(2) 上にプロットしたのが Ashby マップ(3) である。

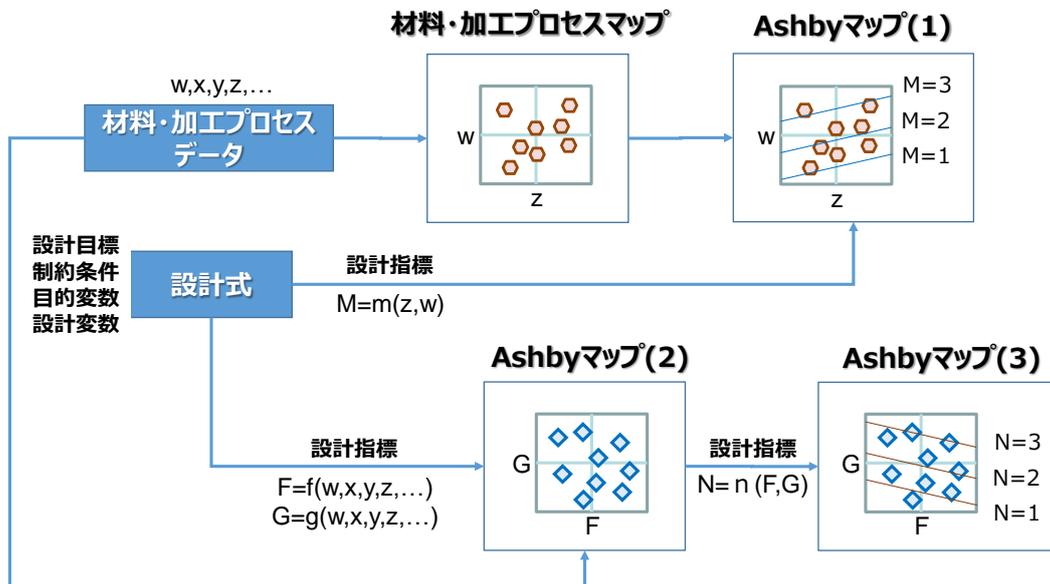


図 1 Ashby 法の全体像

材料・加工プロセスデータ

材料・加工プロセスデータは材料及び加工プロセスに関する情報を多面的に可能な限り数値化したもので Ashby 法の基礎となる重要なデータベースである。

材料データの例を表 1 及び表 2 に示す。表 1 はいわゆる材料物性である。縦弾性係数、密度、熱伝導率といった物性から磨耗率、硬度といった物性が含まれる。また、値段も一応こ

ここに分類している。表2にはエコ属性と感覚属性を示す。エコ属性は環境問題を考える上で重要な項目である。一方、感覚属性は一般に感覚的に表現されるが材料が発する音の高さ、響き、材料を触った際の固さ、冷たさは後述するように材料物性の関数として表現が可能である。

表1 材料データの例（その1） 表2 材料データの例（その2）

| 材料物性 | 略号 | 単位 | 内容 |
|------------------------|-----------------|----------------------|------------------|
| Young's modulus | E | GPa | 縦弾性係数 |
| Density | ρ | kg/m ³ | 密度（単位立法m当たりの質量） |
| Strength | σ_f | MPa | 強さ（幾らの力に耐えるか） |
| Fracture toughness | K _{1c} | MPa.m ^{1/2} | 破壊靱性（欠陥を考慮した強さ） |
| Loss coefficient | η | - | 損失係数（内部損失） |
| Thermal conductivity | λ | W/m.K | 熱伝導率 |
| Electrical resistivity | ρ_e | $\mu\Omega$.cm | 電気抵抗率 |
| Thermal diffusivity | a | m ² /s | 温度拡散率 |
| Thermal expansion | α | μ strain/K | 熱膨張係数 |
| wear-rate constant | k _a | 1/MPa | 摩耗率（単位荷重当たりの摩耗量） |
| Hardness | H | H _v | 硬度 |
| Price | - | \$/kg | 1kg当たりの値段 |

| エコ属性 | 単位 | 内容 |
|-------------------|-------------------------|-----------------|
| Energy content | MJ/kg | 1kg当たりのエネルギー含量 |
| Carbon footprint | CO ₂ (kg/kg) | 1kg当たりの二酸化炭素排出量 |
| Recycle potential | Low/Medium/High | リサイクル性 |

| 感覚属性 | 単位 | 内容 |
|-------------|------------------------|------|
| Pitch | Low(0)/High(10) | 音の高さ |
| Vibrancy | Muffled(0)/Ringing(10) | 音の響き |
| Hardness | Soft(0)/Hard(10) | 固さ |
| Coldness | Warm(0)/Cold(10) | 冷たさ |
| Gloss | % | 光沢 |
| Transparent | YES/NO | 透明 |
| Translucent | YES/NO | 半透明 |
| Opaque | YES/NO | 不透明 |

加工プロセスデータの例を表3及び表4に示す。表3は成型プロセスに関するデータで成型できる重量、最小厚さ、許容誤差等に関する情報を含む。表4は接合プロセス及び表面処理プロセスに関するデータである。このように加工プロセスに関するデータは重量、厚さ、温度、硬さのように数値化できるものもあるが、その他は“できるかできないか”といった二値的表現を取るものが多い。

表3 加工プロセスデータの例（その1） 表4 加工プロセスデータの例（その2）

| 成型プロセス属性 | 単位 | 内容 |
|--|-----------------|-------------|
| Weight range | kg | 成型できる重量 |
| Minimum thickness | mm | 成型できる最小厚さ |
| Shape complexity | Low/Medium/High | 成型できる形状の複雑さ |
| Allowable tolerance | mm | 成型の許容誤差 |
| Surface roughness | μm | 成型後の表面粗さ |
| Economic batch size | | 実用的なバッチ処理量 |
| *Molding, Casting, Bulk Forming, Sheer Forming, RP | | |

| 接合プロセス属性 | 単位 | 内容 |
|--------------------------------|-------------------------|------------------|
| Size of joint | Restricted/Unrestricted | 接合サイズに限界はあるか？ |
| Maximum thickness | Restricted/Unrestricted | どの程度の厚さまで接合できるか？ |
| Unequal thickness | YES/NO | 板厚が異なるものが接合できるか？ |
| Join dissimilar materials | YES/NO | 異種材接合ができるか？ |
| Impermeable | YES/NO | 不透水ができるか？ |
| Processing temp. | C | プロセス温度 |
| *Adhesives, Fasteners, Welding | | |

| 表面処理プロセス属性 | 単位 | 内容 |
|--|-----------|----------|
| Surface hardness | Vickers | 表面の硬さ |
| Coating thickness | μm | コーティング厚さ |
| Curved surface coverage | Good/Poor | 曲面対応 |
| Processing temp. | C | プロセス温度 |
| *Printing, Plating, Polishing, Coating | | |

材料・加工プロセスマップ

材料データから二つのデータを選択して二次元マップ上に表現したのが材料マップである。図2に材料マップの例を示す。ここでは、材料データの内、密度と縦弾性係数を選び、それぞれ横軸、縦軸として対応する材料データをグラフ化している。CES EduPackでは対象とする材料の数、属性の数によって、Level1、Level2、Level3とデータベースが分かれている。図2の結果は材料の数、属性の数が最も少ないLevel1のデータベースを用いている。各材料のデータは楕円状に表示されているが、これは同じ材料でも物性値にばらつきがあることを意味している。金の場合、小さい楕円になっているがこれは物性値のばらつきが少ないことを意味する。大きい島はカテゴリ（金属、自然素材、ポリマー、等）を示し、この中に同じカテゴリにある材料データがプロットされる。このように多くの材料を同じ土俵で俯瞰的に見ることにより、ある程度の知識と経験のある技術者であれば材料選定の予備検討を行うことができる。

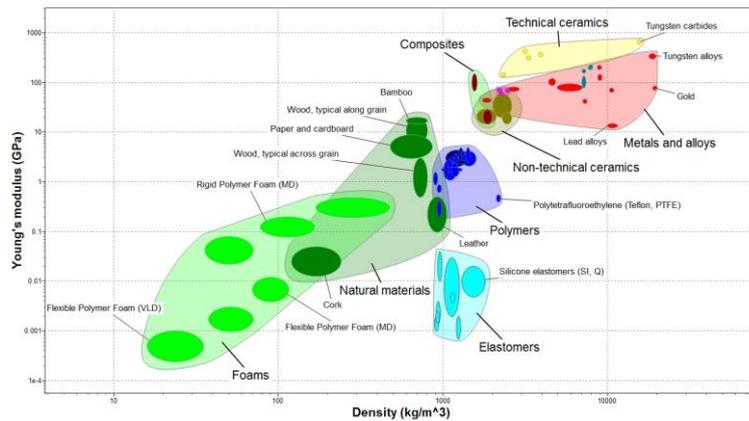


図2 材料マップの例

一方、加工プロセスデータの場合、数値化できるデータとそうでないデータが存在するため加工プロセスマップも多様な表現となる。図3に加工プロセスマップ（成型プロセスの場合）の例を横軸に成型誤差（精度）、縦軸に成型プロセスの種類をとって示す。例えば、3Dプリンタの場合は、0.1mm から 0.5mm の精度で成型可能であることが読み取れるとともに、他の成型プロセスとの比較ができる。

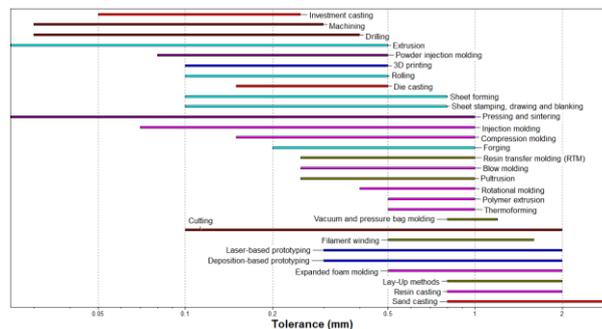


図3 加工プロセスマップの例

Ashby マップ

材料マップ、加工プロセスマップに機械設計の考え方を取り入れ、表現したのが Ashby マップである。図1で紹介したように大きく二種類、この混合型として一種類、計三種類の Ashby マップが考えられる。ここでは、前者の二種類に関して紹介する。

Ashby マップ(1)の例として、“軽くて十分な剛性を有する梁”という設計目標を考える。この場合、十分な剛性を有するという制約条件下で質量を目的変数として最小化するという設計問題に置き換えることができる。そして最終的に設計指標

$$M = E^{1/2} / \rho, \quad E: \text{縦弾性係数}, \quad \rho: \text{密度}$$

が導出される（導出方法の詳細は次回説明する）。設計指標 M は E と ρ で表現されているので、 E と ρ でマップを作成、これ上に M を表現すればいいことになる。すなわち、 E と ρ の二次元マップ（材料マップ）上に上記の設計指標 M をパラメータとしてプロットした図4が Ashby マップ(1)となる。図4には複数の破線がプロットしてあるが、同じ M 値上

の材料は“軽くて十分な剛性を有する梁”という設計目標に対して等価であることを意味する。また、M 値は大きいほどよく、十分な剛性を有しつつ、より軽量化が可能な材料であることになる。図 4 中に自然素材のカテゴリにあるいくつかの材料名を記載しているが、この図から、竹が“軽くて十分な剛性を有する梁”として優秀な材料であることが見て取れる。

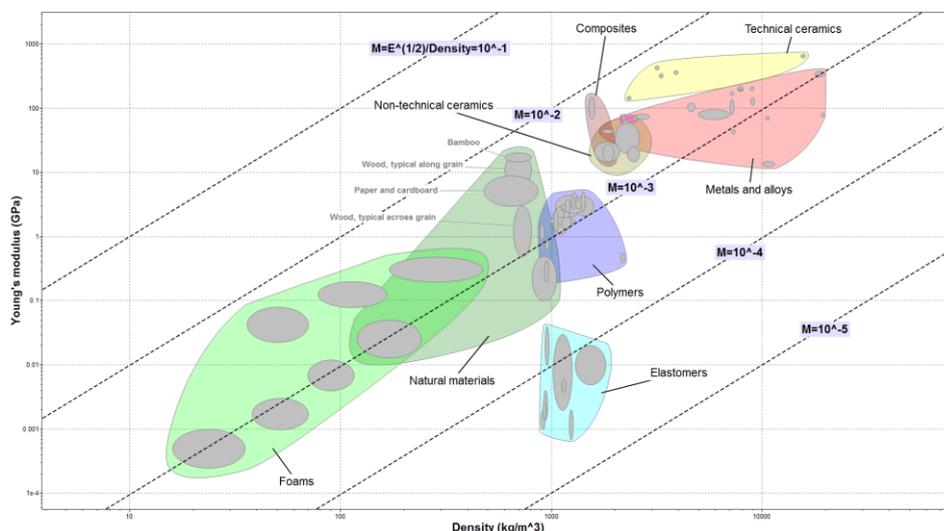


図 4 Ashby マップ(1)の例

Ashby マップ(2)の例として、表 2 の感覚属性の幾つかを材料物性で表現することを考える。最初に聴覚に関する Pitch (音の高さ) と Vibrancy (音の響き) について考える。Pitch は音速に関係、Vibrancy は減衰率に関係すると考えられるので以下のように定義することができる。

$$\text{Pitch}=(E/\rho)^{1/2}, \text{Vibrancy}=1/\eta, E: \text{縦弾性係数}, \rho: \text{密度}, \eta: \text{減衰率}$$

Pitch を横軸に、Vibrancy を縦軸にして、これに該当する材料をマッピングしたのが図 5 である。ここでは、材料の数、属性の数が最も多い Level3 のデータベースを用いている。Pitch, Vibrancy の定義が上記で本当にいいのかという課題は残るが、感覚的には実際の材料の特性を良く表している。また、全体を見渡すと大きく二つの領域に分類できることがわかる。すなわち、Pitch に比べて Vibrancy が変化している金属、セラミック等の領域と、Vibrancy に比べて Pitch が変化しているプラスチック等の領域に分かれている。

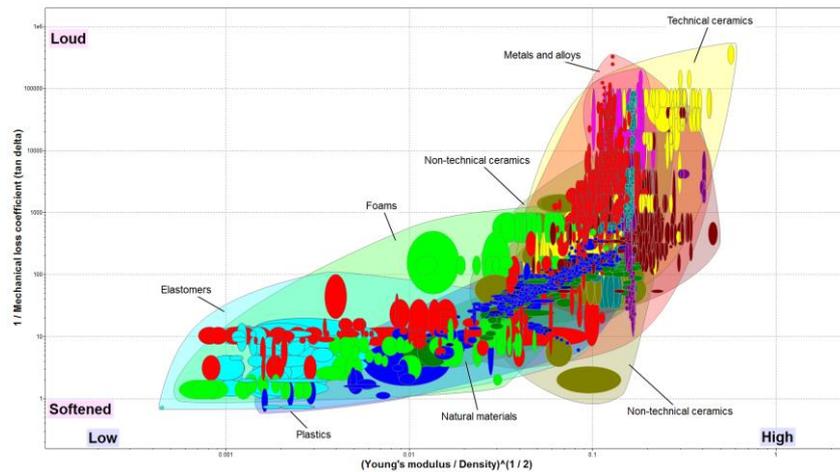


図5 Ashby マップ(2)の例 (聴覚量への適用)

次に、触覚に関係する **Hardness** (固さ) と **Coldness** (冷たさ) について考える。**Hardness** は縦弾性係数と硬度に関係、**Coldness** は熱特性 (熱伝達率、比熱容量) と密度に関係すると考えられるので以下のように定義することができる。

$$\text{Hardness}=(EH)^{1/2}, \text{ Coldness}=(\lambda C_p \rho)^{1/2},$$

E : 縦弾性係数、H : 硬度、 λ : 熱伝達率、 C_p : 比熱容量、 ρ : 密度

Hardness を横軸に、**Coldness** を縦軸にして、これに該当する材料をマッピングしたのが図6である。これから、**Hardness** と **Coldness** はほぼ比例関係にあることが分かる。すなわち、硬い材料は密度も高く、熱の伝わり方も良いという現実を表している。

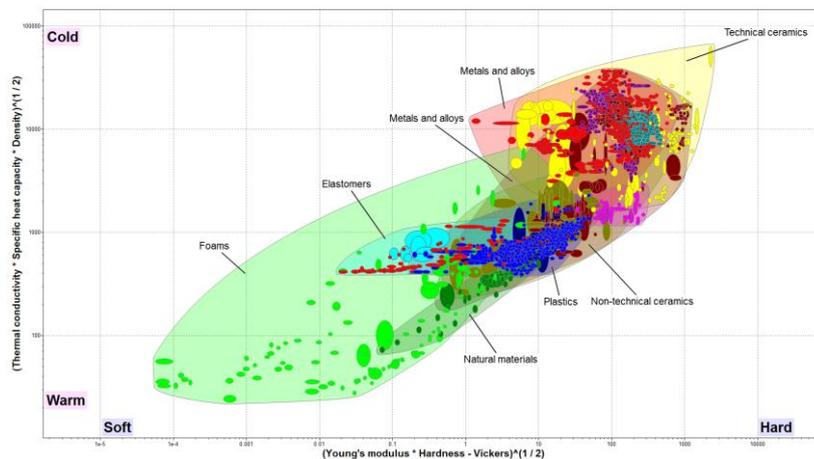


図6 Ashby マップ(2)の例 (触覚量への適用)