

異方性カスタム材質・形状制御について

中野 貴由¹⁾ 石本 卓也²⁾ 萩原 幸司^{**} 井手 拓哉¹⁾ 中本 将嗣²⁾
蘇 亜 拉²⁾ 孫 世海²⁾ 荒木 秀樹^{****} 玉岡 秀房³⁾

* 大阪大学大学院工学研究科マテリアル生産科学専攻; 1)教授 2)講師(〒565-0871 吹田市山田丘 2-1)

** 大阪大学大学院工学研究科知能・機能創成工学専攻; 准教授

*** 大阪大学大学院工学研究科附属異方性カスタム設計・AM研究開発センター; 1)副研究総括・特任研究員 2)特任助教 3)研究総括・特任研究員

**** 大阪大学大学院工学研究科附属アトミックデザイン研究センター; 教授

Control of “Material Parameters” and “Structural Parameters” for Anisotropic and Customized Design; Takayoshi Nakano*, Takuya Ishimoto*, Koji Hagihara**, Takuya Ide***, Masashi Nakamoto***, Suyalatu***, Shihai Sun***, Hideki Araki**** and Hidedusa Tamaoka*** (*Division of Materials and Manufacturing Science, Graduate School of Engineering, Osaka University, Suita. **Department of Adaptive Machine Systems, Graduate School of Engineering, Osaka University, Suita. ***Anisotropic Design & AM Research Center, Osaka University, Suita. ****Center for Atomic and Molecular Technologies, Osaka University, Suita)

Keywords: *delight, optimal design, anisotropy, materials parameter, shape parameter, crystallographic texture, single crystal*

2015年 8月 4日 受理[doi:10.2320/materia.54.502]

1. はじめに

高付加価値でコモディティ化を生み出さない製品創出には、ユーザにとってのデライト品質(なくとも良いが、あれば非常に満足)、もしくは、これまでにない新機能、従来の性能(マスト品質)をはるかに凌駕する超高性能を付与することが必須である。この実現を達成する手段として、金属AM(Additive Manufacturing: 付加製造)に代表される革新的な生産・製造技術がIoT(Internet of Things: ものインターネット)やマスカスタマイゼーションとリンクしつつ、有効活用されるものと期待される⁽¹⁾。こうしたユーザ各々のデライトを満足させるためにカスタム化された新たな商品群、さらには異なるものづくり概念に基づく新規市場の開拓が日本のものづくりスタイルを変革し、ものづくり大国としての地位を奪還することが期待される。

本SIP拠点は、大阪大学大学院工学研究科材料系研究者を中核とすることから、材質と形状の同時制御により実現される最適化材料設計を最大の特徴とする。そこで本稿では高付加価値でデライトな異方性カスタム市場の創発に向けた本SIP拠点の戦略について紹介する。

2. 異方性エンジンによる最適化材料設計

産業基盤である金属材料を中心とした難加工材の開発はものづくり革命の起爆剤となりうる。金属材料での高機能性発現は、新素材の創製やその組織制御によって達成されてきた。本SIP拠点は、超上流でのものづくりにおける最適化材料設計のためのマテリアルズ・インフォマティクスを含む「異方性エンジン」の開発に基づき、デライトな感性を引き

出す「デライトエンジン」との協調により異方性カスタム製品を具現化するという超上流設計思想を特徴とする。

一般に、世の中に広く普及している材料は、多くの製品群ではできるだけ等方的な設計がなされている(図1(a))。例えば、力学的観点からは、部材が任意の外力に対してマクロに均一な塑性変形を生じるには5個の独立なひずみテンソル成分を持つ必要があることから(von Misesの条件)、金属材料では、対称性が高く独立なすべり系が多い等方性の高い結晶構造を有する材料が、構造用部材をはじめとする種々の製品群において選択されてきた。しかし、デライト品質を生むための高機能化は、等方性材料において実現されるとは限らない。我々は、従来型の等方性ものづくりから脱却し、特定の方向に極めて優れた機能性を発現するような最適な「異方性」の追求(図1(b)参照)が、超上流での材料設計の一つの解となる可能性を仮説・検証しようとしている。

3. 異方性カスタム化のための材質・形状制御

ものづくりに重要なリードタイム短縮や顧客起点の一气通貫モデルの実現には、材質パラメータと形状パラメータの同時制御、すなわち内外形状と金属特有の組織由来の材質を上流で最適化し、下流まで淀みなく生産・製造することが必要とされる。通常、材質制御と形状制御は独立したプロセスであるため、それらの同時制御の実現には、最先端の生産・製造技術と材料科学とを融合させた新たなものづくりテクノロジーが必要である。

図2に示すように、材質パラメータとしては、結晶構造、原子配列の規則性、結晶粒形状、結晶集合組織、結晶粒界の有無(単結晶・柱状晶・多結晶)、溶質濃度勾配、析出相分布などが挙げられる。とりわけ本拠点では、初期ターゲットと

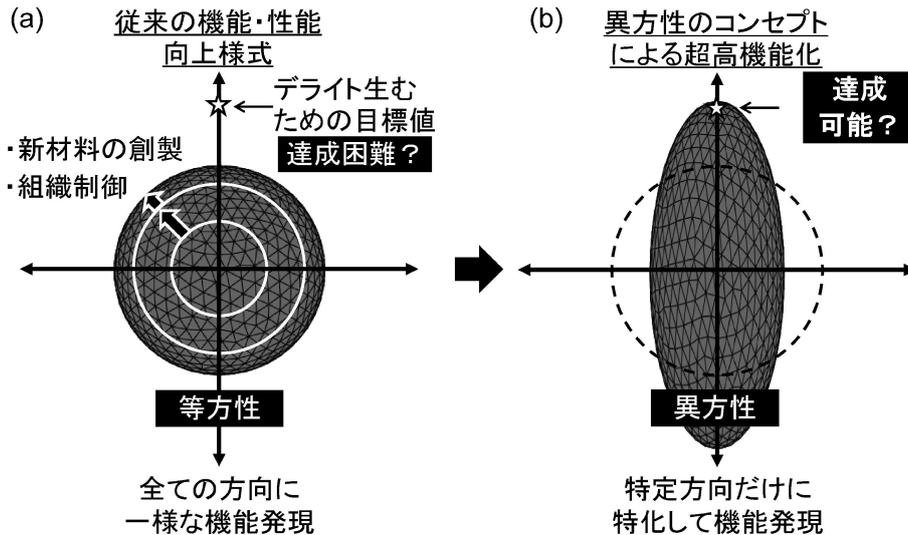
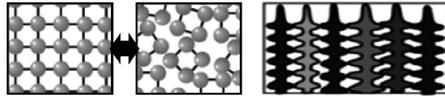


図1 (a)従来型の等方性の機能発現に基づく製品機能向上様式と、(b)異方性の概念を導入した場合に可能となる高機能化様式の場合の概念図。ユーザのデライトを生み出すための超高機能化は、異方性の導入・最適化と相関する可能性を持つ。

材質パラメータ

- ・結晶構造、原子配列の規則性
- ・材料組織(結晶粒径、形状)
- ・集合組織(多結晶・柱状晶)
- ・単結晶
- ・濃度分布



形状パラメータ

- ・外形形状
- ・表面形状、パターンニング
- ・内部構造
 - * セル形状
 - * ソリッド体の配置

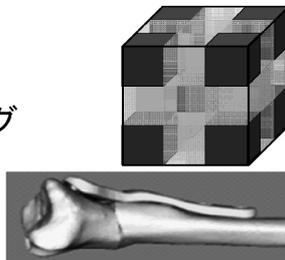


図2 金属材料において異方性カスタム化を制御可能な材質パラメータと形状パラメータ。

して設定した4つの異方性カスタム化製品群(カスタム冷熱デバイス製品、カスタム家電、伴侶動物用カスタムインプラント、材質・形状制御タービンブレード)への適用を視野に入れ、AMを中心とした革新的設計生産技術の基礎から応用展開までの研究開発を推進している。例えば、究極の組織制御ともいえる単結晶化は、固液界面を平滑に保ち組成的過冷等の定常状態からの乱れを回避するために、合金組成に依存して固液界面移動速度や温度勾配などの様々なパラメータを制御する。材質制御に関するビッグデータの利用やデータベースの蓄積は、材質パラメータを上流で自在に操るCAM(Computer Aided Manufacturing)の構築にもつながる。

加えてAM法や最先端の加工法は形状制御を可能とする。ここで、我々はデライト品質を突き詰めた際の究極の選

択肢として、異方性のカスタム化に注目している。ペルチェ素子の熱電変換効率、カスタム家電における使い心地の良さ、ボーンプレートへの応力遮蔽の抑制と再骨折防止、タービンブレードの耐熱性向上など、感性から性能に至るまでの最適化設計・生産では、異方性の最適化が一つのデライトを導く解になる可能性を有している。

例えば、FZ(浮遊帯域溶融)法により育成された β 型Ti合金(bcc)単結晶は、弾性率の異方性が顕在化し、抜去不要な超低弾性伴侶動物用カスタムインプラントを実現する⁽²⁾。しかしながら、FZ法による材質制御では、同時の形状付与ができず、後加工が必要となる上、作製可能なサイズには限界がある。

一方、AM法による形状パラメータの最適設計は、外形形状や内部構造の異方化(図2)を誘導できる。形状パラメータは基本的には、三次元CAD技術を用いることで任意のサイズ、形態、階層ごとに最適設計される。外形形状の異方性カスタム化は、例えばボーンプレートでは、骨の三次元CT画像よりブーリアン演算を用いて、骨形状にジャストフィットするデバイスをPC上でデザイン可能とする。内部形状についても設計可能である。ただし、その設計がどこまで製品として具現化可能であるかは、最適化設計を製品に転写する製造技術の革新性に律速される。多軸マシニングセンタやAM技術により形状制御の自由度は飛躍的に向上し、とくに後者のAM技術は、これまで困難とされていた材質・形状の同時制御を具現化できるようになっている⁽³⁾⁽⁴⁾。AM法の一つである粉末床溶融法は、形状パラメータの制御と同時に熱エネルギー投入の方向性や熱勾配、そして熱流束を制御することで、材質パラメータを形状パラメータとは独立に制御でき、さらにプロセスパラメータのデータ蓄積は異方性の任意付与をも可能とする。すなわち、ユーザのニーズ、使用環境に適合させてカスタム化された材質・形状は、究極には最適な異方性設計にもなる可能性を秘め、完全等方では得られな

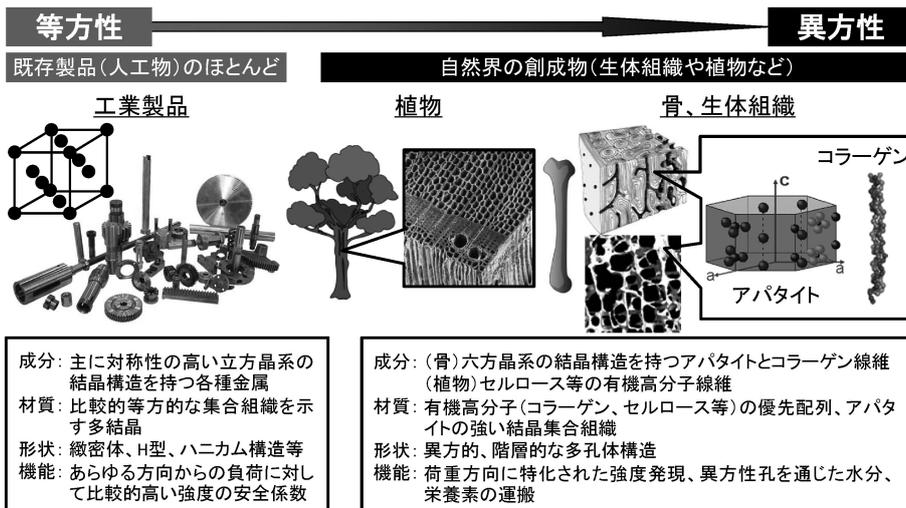


図3 等方性を示す既存製品(人工物)と、極めて異方的な材質・形状とそれらに由来する卓越した機能性を示す自然界の創成物との対比。自然界の創成物の異方性は当拠点で目指す新たなものづくりスタイル構築のヒントになる。

い異方性カスタム新市場の創成を導きうる。

4. 異方性機能化デザインのヒント ～自然界の創成物～

デライト品質を追求する超上流設計思想として異方性機能化デザインに注目するには理由が有る。既存製品(人工物)のほとんどが、等方的な機能を発揮するよう設計されてきたのに対し、自然界の創成物、例えば骨などの生体組織や植物などは極めて理にかなった異方性階層構造と、その結果としての異方性機能を発揮する場合がほとんどである(図3)。人工物ではせいぜい、曲げやねじりといった荷重負荷環境に合わせた、最終段階での形状付与(H型、ハニカムなど)により、軽量化、高比強度化を目的とした異方性の設計がなされる程度である。一方、骨や植物では、mm、 μm スケールから、nmオーダーでの有機分子、無機結晶の原子配列に至るまで、緻密なマルチスケールでの階層的異方性構造が存在する。各スケールレベルでの異方性構造の有機的連携は、過酷な荷重負荷環境に耐える極めて優れた力学的機能や生命維持のための水分や栄養素の運搬、排出といった多くの役割をもつ器官として機能する。加えて、荷重の方向性や大きさ、さらにはその変化に合わせて、材質・形状の異方性度合がカスタム化される⁽⁵⁾⁽⁶⁾ことも重要な特徴である。

すなわち、等方性製品を上回るデライト品質を具備した高付加価値製品の創製には、自然界の創成物に学ぶべき生体模倣的な概念が重要になるものと期待され、ニーズに合わせてカスタム化された異方性度合の最適化がデライト品質獲得への鍵となりうる。実際の超上流設計における異方性エンジンの開発は、材質・形状パラメータの制御によって実現され、デライト品質へとつながるとの仮説を構築している。

5. おわりに

本拠点で掲げる超上流設計概念としての、材質・形状同時制御は異方性カスタム化を最適解とし、初期ターゲットとして設定した4つの製品群にとどまらず、分野や用途を問わない「異方性エンジン」として共通基盤化されるものと確信している。ニーズに合わせたデライト品質の追求は、最適化された異方性カスタム化にたどり着く可能性を持つ。究極の最適化設計図は、最適化材料設計をも上流で含んでおり、テストユースを繰り返し、フィードバックすることでこれまでにない進化するものづくりが実現できるはずである。インダストリー4.0を超える究極のものづくりスタイルの構築において、上流での材質・形状設計と制御の役割は大きく、金属AM技術をはじめとする革新的生産技術もそれを支配する学理の解明から理解することが求められている。現在、その達成に向け当拠点メンバーが一丸となって取り組んでおり、近い将来、究極の革新的設計生産が「異方性カスタム化」の概念でのものづくりによりアウトプットされることを期待している。

文 献

- (1) まるわかりインダストリー4.0 第4次産業革命, 日経BP社, (2015).
- (2) 当代光陽, 萩原幸司, 石本卓也, 山本憲吾, 中野貴由: 鉄と鋼, **101** (2015), 501-505.
- (3) T. Nakano and T. Ishimoto: KONA Powder and Particle Journal, **32** (2015), 75-84.
- (4) N. Ikeo, T. Ishimoto and T. Nakano: J. Alloys Compd., **639** (2015), 336-340.
- (5) T. Nakano, K. Kaibara, Y. Tabata, N. Nagata, S. Enomoto, E. Marukawa and Y. Umakoshi: Bone, **31** (2002), 479-487.
- (6) C. Mattheck: Design in nature: learning from trees, Springer-Verlag, Berlin, (1998).