

講演4 「金属3D積層造形に係る 異方性制御技術開発」

大阪大学大学院工学研究科マテリアル生産科学専攻
生体材料学領域 教授

大阪大学工学研究科附属異方性カスタム設計・AMセンター
副センター長(兼)

中野 貴由

日時: 2019年3月7日(木) 13:00~17:00 (16:10~16:55)

場所: 大阪工業大学 梅田キャンパス

主催: 近畿経済産業局

協力: 3Dものづくり普及促進会



SIP(戦略的イノベーション創造プログラム) - 革新的設計生産技術

三次元異方性カスタマイズ化設計・付加製造拠点の構築と地域実証

~ 異方性カスタム設計・AM研究開発センター ~



○現在

大阪大学大学院工学研究科マテリアル生産科学専攻教授

大阪大学国際医工情報センター教授(兼任)

大阪大学大学院工学研究科附属構造・機能先進材料デザイン教育研究センター教授(兼任)

大阪大学工学研究科附属異方性カスタム設計・AM研究開発センター副センター長(兼任)

中野貴由(なかの たかよし)51歳

○学歴・職歴

昭和61年3月 岡山県立倉敷天城高等学校卒業

平成2年3月 大阪大学工学部卒業

平成4年3月 大阪大学大学院工学研究科修士課程修了

平成4年4月 大阪大学工学部材料物性工学科助手

平成8年3月 博士(工学)(大阪大学)の学位取得

学位論文「TiAl系金属間化合物の力学特性に関する研究」

(異方性金属間化合物の塑性変形への重要性について解明)

平成11年4月 大阪大学大学院工学研究科マテリアル科学専攻講師

平成13年6月 大阪大学大学院工学研究科マテリアル科学専攻助教授

平成20年4月 大阪大学大学院工学研究科マテリアル生産科学専攻教授

現在に至る

○学会活動等

日本バイオマテリアル学会(常任理事、IUSBSEフェロー)、(公社)日本金属学会(副会長、科研費委員会委員長)、日本骨形態計測学会(理事、H29会長)、日本MRS(理事)、日本骨代謝学会(あり方委員会委員)、日本学術会議連携会員(第24期・25期)他

日刊 THE NIKKAN 工業 KOGYO SHIMBUN 新聞

2月27日 水曜日

2019年(平成31年)

○3回連載

- (上) 2月27日
- (中) 3月 6日
- (下) 3月13日

設計のセツケイ SIP革新的設計生産技術

⑤

高い機能発揮

必要な方向に高い機能を発揮させるカスタムモノづくり。内閣府が実施する戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)革新的設計生産技術において、我々が取り



大阪大学大学院
工学研究科教授

中野 貴由氏

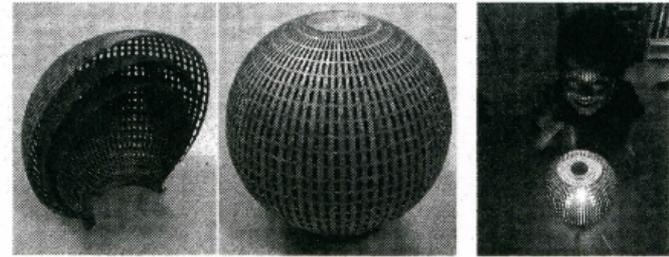
組んだ「三次元異方性カスタマイズ化設計・付加製造拠点の構築と地域実証」を紹介する。

大阪大学工学研究科付属異方性カスタム設計・AM(積層造形)研究開発センターを中心拠点として、パナソニックと川崎重工業、帝人ナカシマメディカル(岡山市東区)、大阪府立大学、京都大学、東京大学、大阪産業技術研究所などが産学官連携で英知を結集して、金属3Dプリンター技術の研究開発を進めてきた。

背景には少品種・大量生産の時代から、多品種・少量生産へ、さらには

異方性カスタムAM

【カスタム照明シェード】



【カスタム形状骨プレート・人工股関節】



金属3Dプリンターで作製した造形物の造形物が自由自在に設計・製造

多品種・大量生産によるカスタマイゼーションへの時代の変化がある。そこで製造技術とIoT(モノのインターネット)、人工知能(AI)、ビッグデータ(大量データ)活用といった情報科学技術を融合させ、金属3Dプリンター

を中心と
ノづくり
関西地域
して世界
の拠点形
た。

感性主
本拠点
ードは

付加製造(AM): 材料の付着によって立体物をつくる加工法(足し算)



(従来)切削加工: 物質を削りとって立体物をつくる加工法(引き算)

AM技術は新しいものづくりへの扉を開く技術として期待されている



Additive Manufacturing 技術

○平成26年9月1日～平成31年2月28日

SIP/革新的設計生産技術

・三次元異方性カスタマイズ化設計・付加製造拠点の構築と地域実証



SIP(戦略的イノベーション創成プログラム) - 革新的設計生産技術

三次元異方性カスタマイズ化設計・付加製造拠点の構築と地域実証

～ 異方性カスタム設計・AM研究開発センター ～

○平成30年11月1日～平成35年3月31日

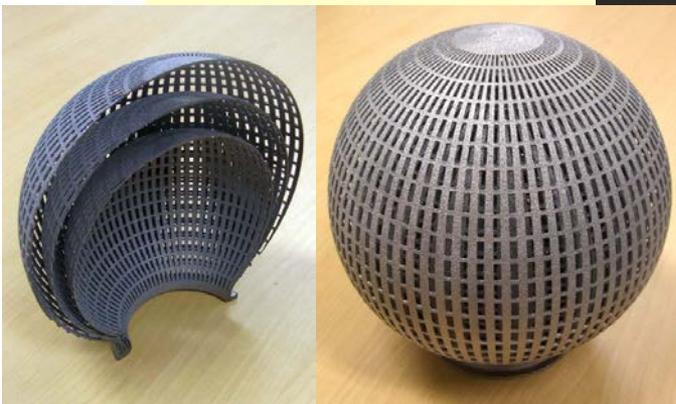
SIP/統合型材料開発システムによるマテリアル革命

・A2「プロセスデザイン」

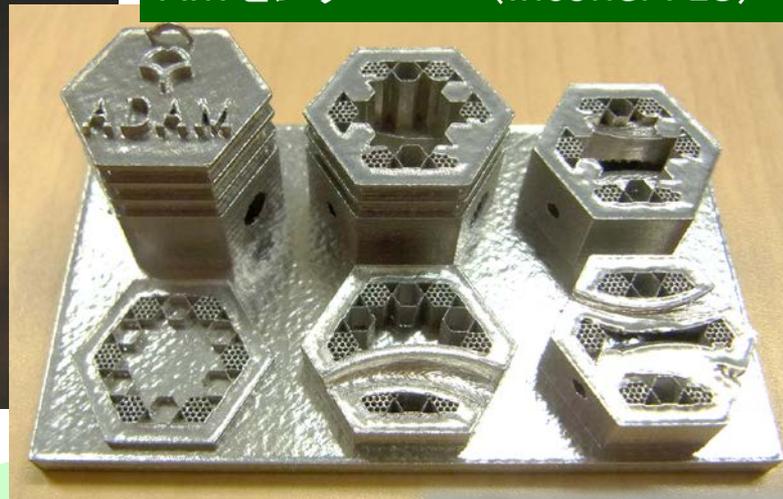
・C1「Ni基合金の3D積層造形プロセスの開発」

・C4「高性能TiAl基合金動翼の粉末製造プロセス開発と基盤技術構築」

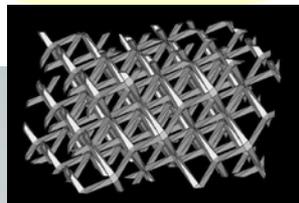
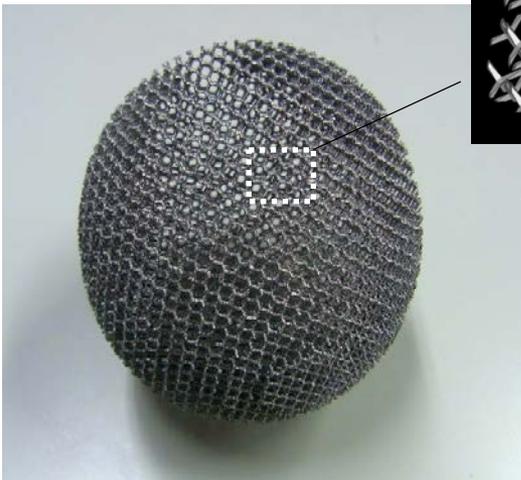
カスタム照明シェード



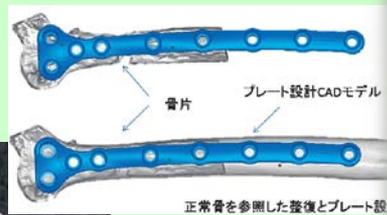
AMセンターロゴ (Inconel 718)



メッシュボール

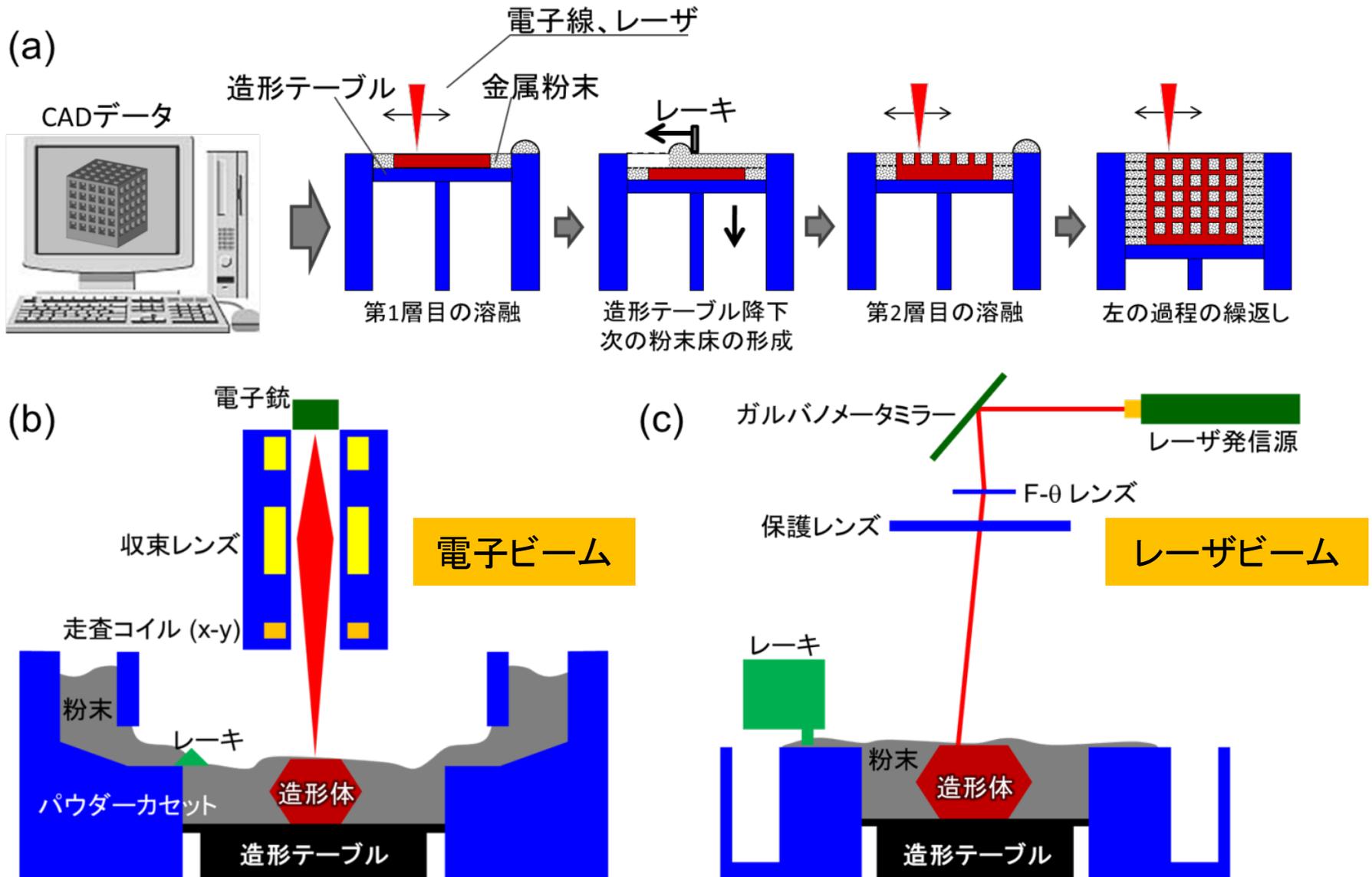


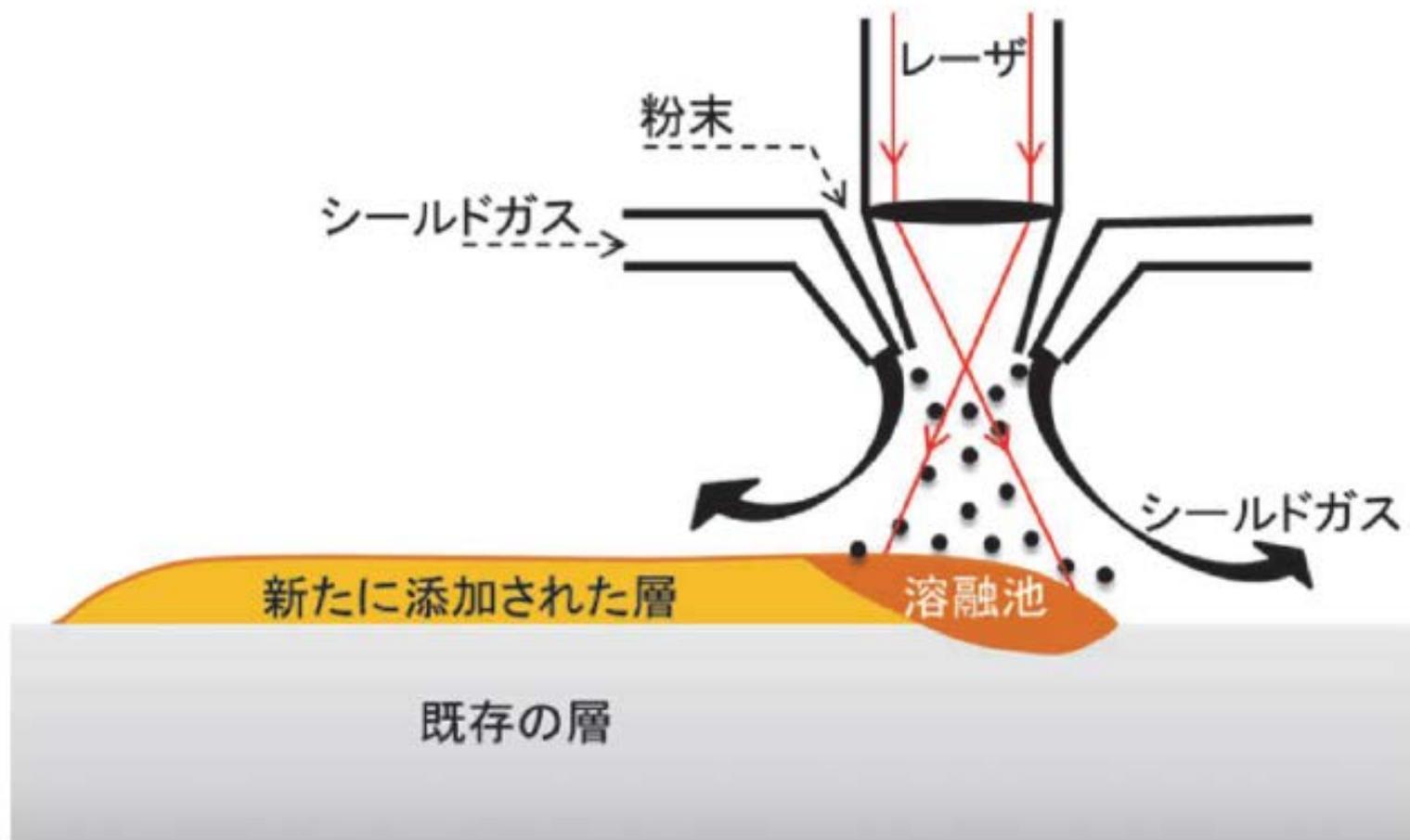
シェル構造



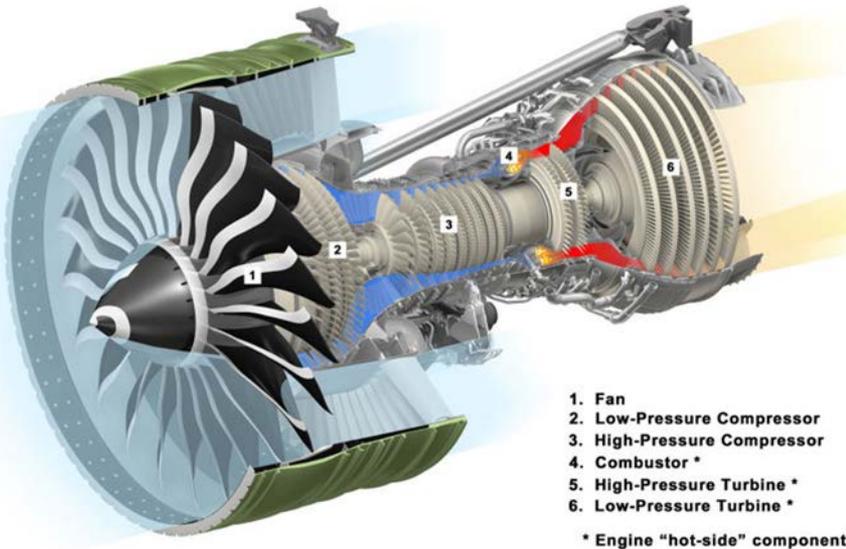
カスタムメイド骨プレート







現状の問題点: 鋳型との高反応性・少量生産への対応困難



鋳型を用いた鋳造



鋳型との反応・多段階の工程
・難加工材の切削性の悪さ

解決策



モールドレス積層造形

金属AMによるモールドレス形状付与

電子/レーザービーム

融解層

任意形状造形

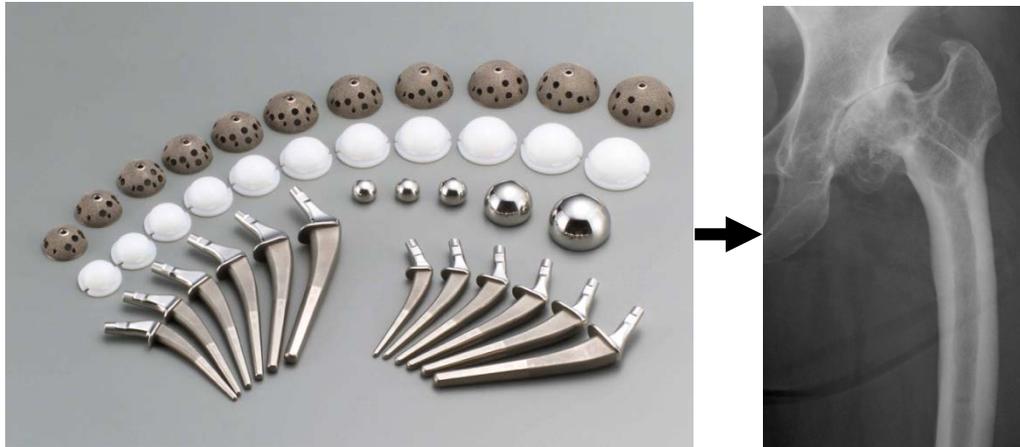
航空機用
部材

自動車用
部材

切削加工が不要なく
省プロセス化が可能

ニアネットシェイプ化

○画一的なサイズのみを提供



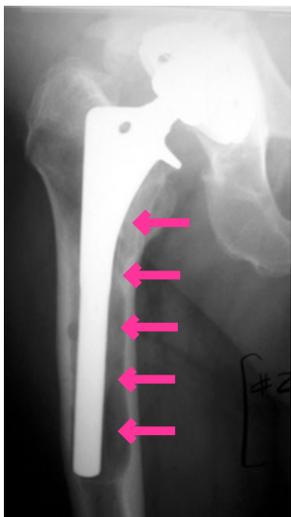
平均骨格形状に
基づいた設計

形状不一致による
骨格形状への不適合

解決策

カスタムメイド化

○インプラントと周囲骨の力学機能の大きな相違



インプラント v.s. 周囲骨
(ヤング率: 110 GPa v.s. 20 GPa)

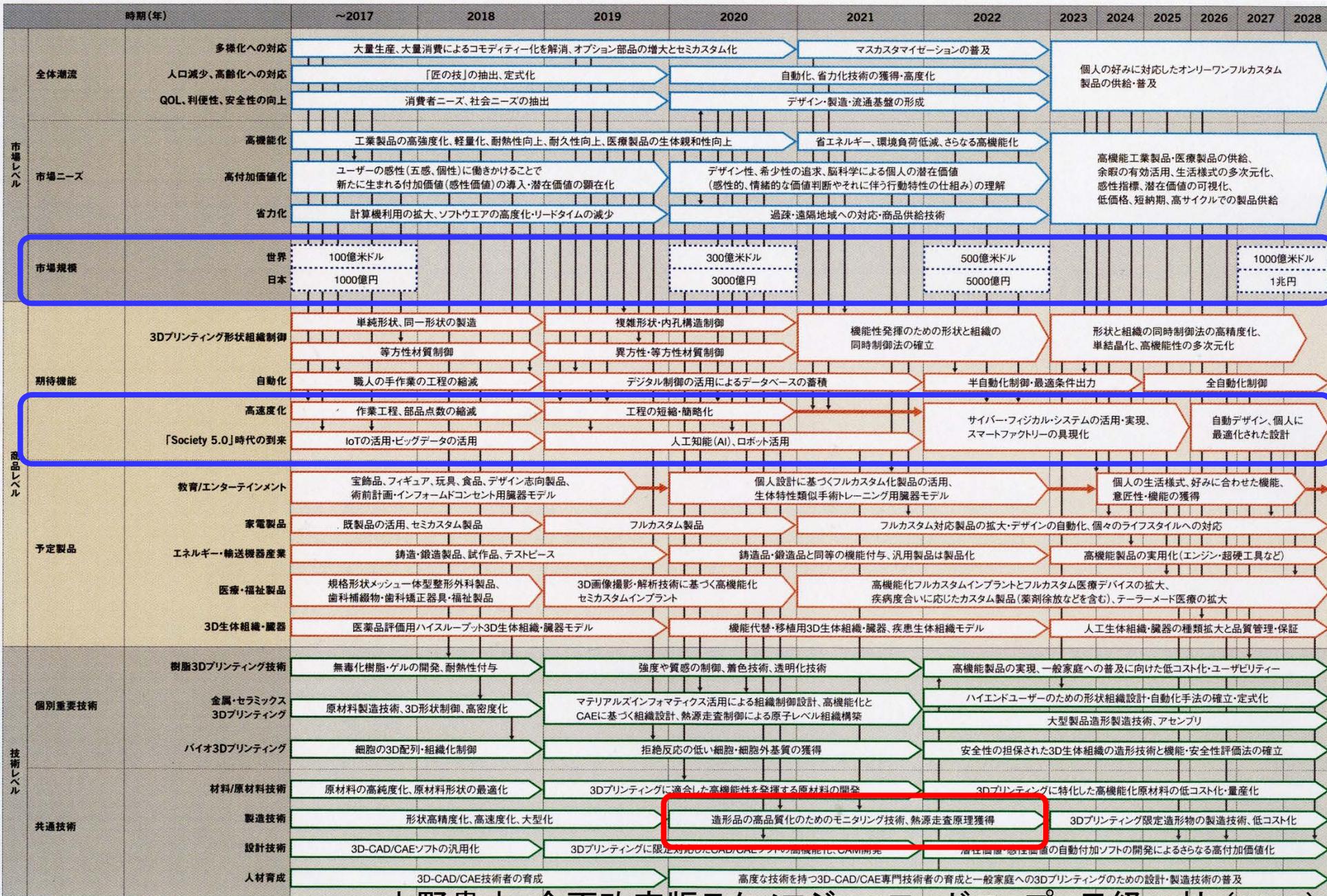
応力遮蔽

周辺骨の吸収・骨質低下・骨折・破損

解決策

骨類似機能化(ヤング率・衝撃吸収)

ロードマップ(3Dプリンティング)



中野貴由: 全面改定版テクノロジー・ロードマップ、目経BP社、(2018)

阪大異方性カスタム設計・AM(3Dプリンター) 研究開発センター

体制

センター長： 田中敏宏 工学研究科長

副センター長： 中野貴由 教授

教員： 50名程度(兼任)

事務局(事務員2名(研究総括、事務補佐))

研究員(助教1名、技術員特任研究員・5名)

大阪大学吹田キャンパス内

ARCAM (電子ビームによる金属AM装置)



EOS M 290(レーザービームによる金属のAM装置)

異方性カスタム設計・AM(3Dプリンター)研究開発センターの強み と開発項目

14

- (1) 日本の大学で、唯一、電子ビーム熱源・レーザビーム熱源の金属3Dプリンターを保持しており、両者の特性を公平に比較可能。
- (2) 国産電子ビーム金属3Dプリンターを保有(テストユースによる制御パラメータの多様化対応)。
- (3) カスタマイゼーションのための形状制御・材質制御を中心に研究開発技術を保有。
- (4) 等方／異方性組織制御技術を研究開発中(3D材質制御法)。
- (5) 3D機能設計・残留歪解析・CAE解析。
- (6) 各種金属(Fe系(ステンレス鋼を含む)、Ni系、Al系、Ti系、Cu系、Cr系、W系、Zr系、Ta系)・複合材(金属/セラミックス/高分子)・金属間化合物・ハイエントロピー合金の造形と機能発現研究開発を実施。

品質保証

3次元材質・形状解析

複合ビーム加工
観察装置(FIB-SEM)



JEOL 4610F

製造 最先端の金属3Dプリンター

電子ビーム (Arcam Q10) レーザ (EOS M 290)



樹脂の3Dプリンター

Creatr XL



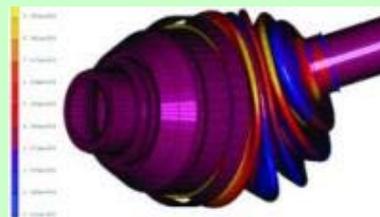
Agilista-3100

設計・解析

3D-CAD Solidworks

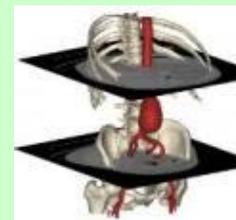


応力・熱解析



MSC Marc

データ変換 (CT→3次元)



Mimics/3-matic



SIP(戦略的イノベーション創造プログラム) - 革新的設計生産技術

三次元異方性カスタマイズ化設計・付加製造拠点の構築と地域実証

～ 異方性カスタム設計・AM研究開発センター ～

等方性と異方性

機能のあらゆる方向への均一性

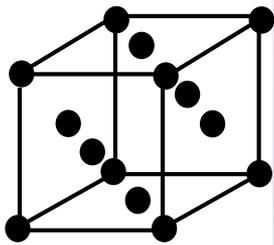
必要な方向に高機能性能発揮

等方性

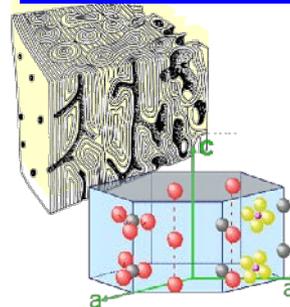
異方性(生体模倣)

人工物
(中程度の機能)

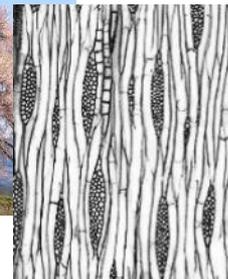
自然界の構成物
(生体組織や植物など)



アルミ・鉄・銅



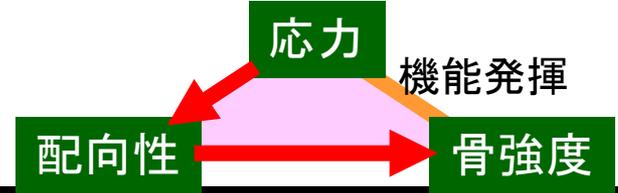
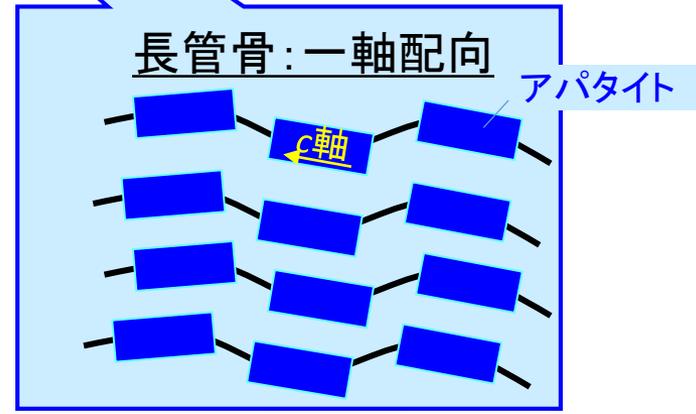
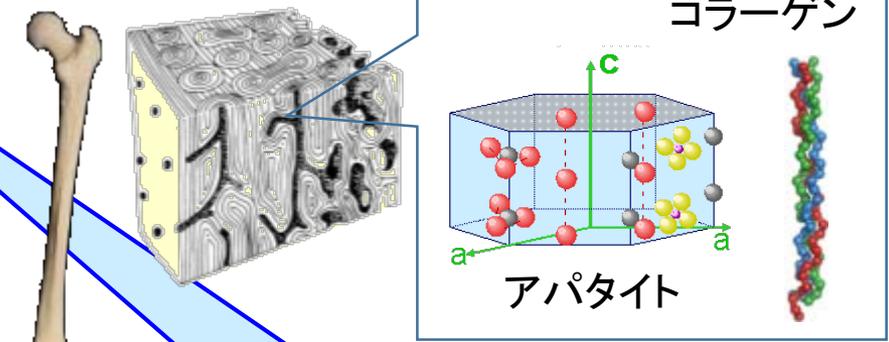
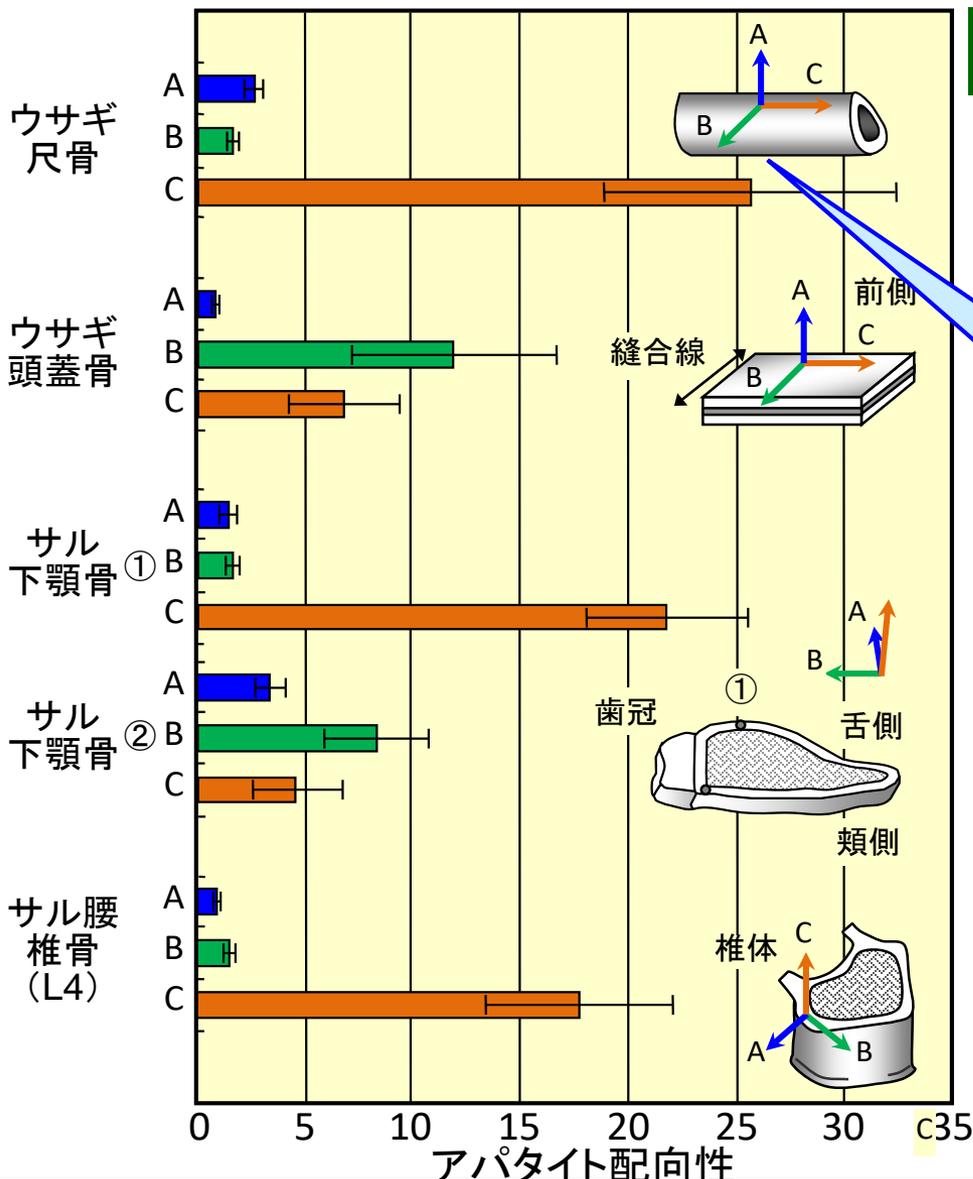
骨、生体組織



- (1) 現在の人工物の大部分は方位制御されていない等方性
- (2) ものづくりに高機能化が求められる中、必要な方向に超高機能性を発揮するような異方性ものづくりを提案
- (3) 均一性を求める人工物には等方性ものづくりを提案

異方性の例：骨は骨密度よりもアパタイト配列方向性(配向性)が大切

自然界における異方性 骨、生体組織



骨部位に応じた適切な配向性(異方性)を示す

(T. Nakano et al, Bone (2002), Bone (2012), JBMR (2013), Bone (2014), SREP (2016))

金属AMで行おうとする 形状・材質パラメータの同時制御

AMは形状の制御を行う技術として考えられがち。しかし、金属3Dプリンタは、機能性に直接関わる等方性／異方性材質制御も可能。

3次元金属AM
システム

=

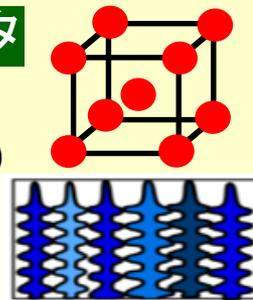
材質
パラメータ制御

+

形状パラメータ
制御

材質パラメータ

- ・材料選択(異なる物性値)
- ・材料組織(結晶粒径、形状)
- ・結晶方位
(多結晶・方向制御材)
- ・単結晶化



形状パラメータ

- ・表面形状パラメータ
- ・内部構造パラメータ
 - * セル形状
 - * ソリッド体の配置など

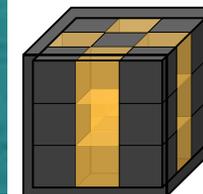
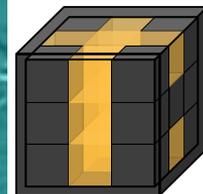
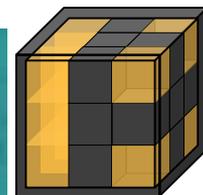
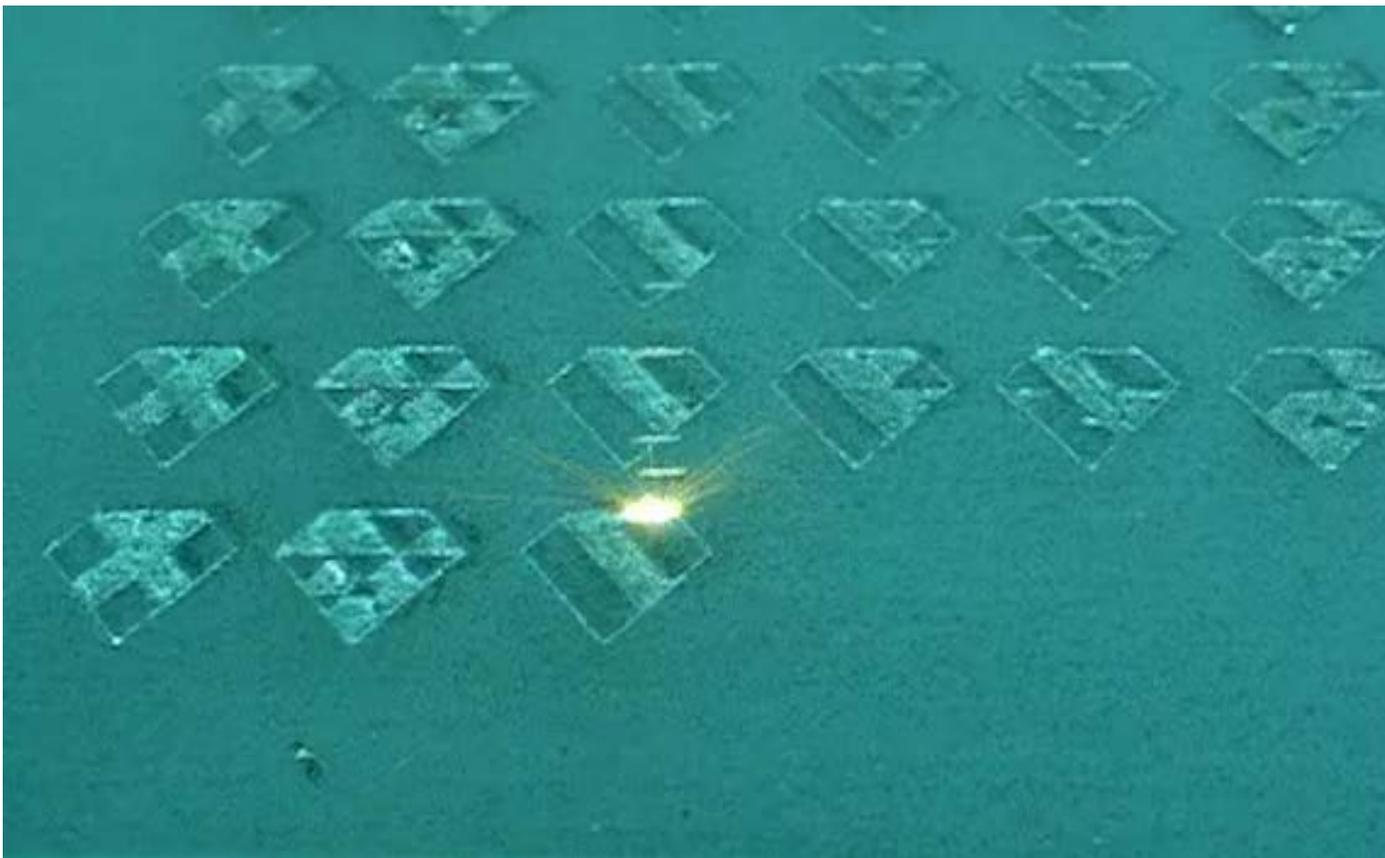
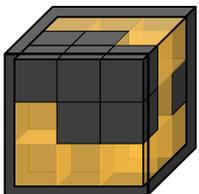
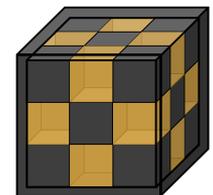


等方性／異方性、材質P／形状Pの同時制御

◎ 異方性形状制御

Powder/Solid複合体化による
力学機能異方化

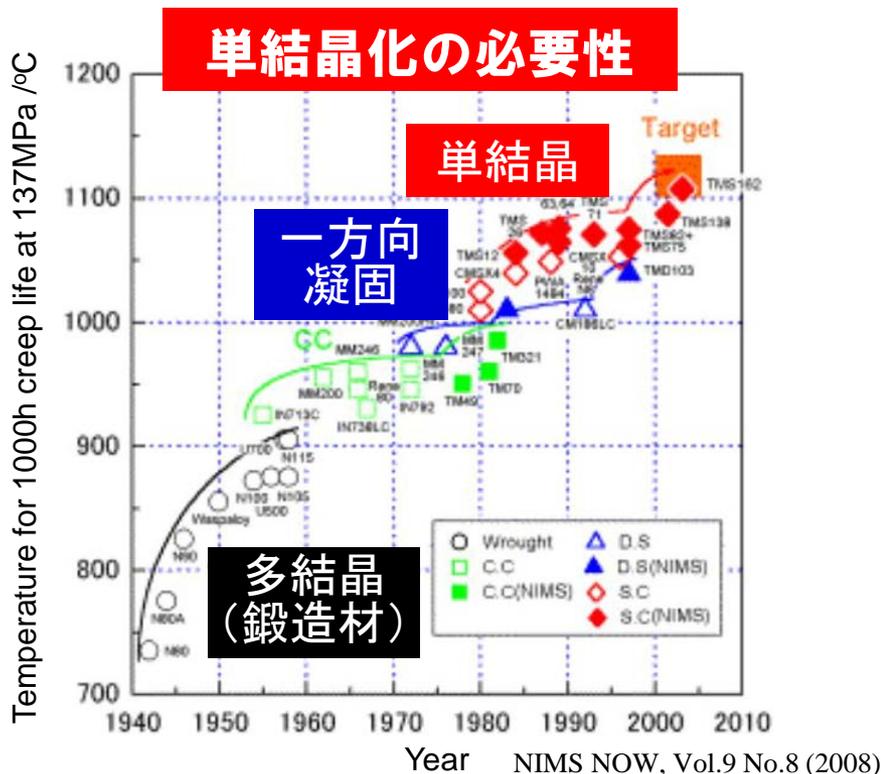
～形状制御を主として利用した
生体骨異方性模倣材料の設計～



◎ 異方性組織制御

走査方向制御による結晶方位制御
～材質制御を主として利用した
 β TiやNi基超合金単結晶状材料の設計～

◆ 航空宇宙材料

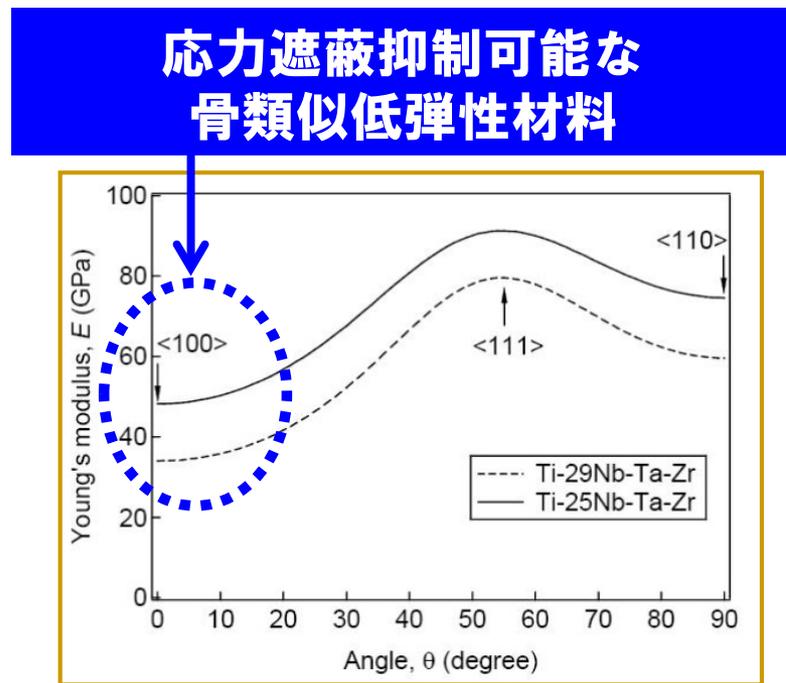


(一方向凝固化、)単結晶化することで高温強度が大幅に向上



タービンプレートなどへの適用が期待

◆ 高機能化生体材料



M. Tane, T. Nakano et al.: Acta Mater 2008.

β 型Ti合金単結晶体を作製することで特定の方角の特性のみを利用可能



ボーンプレートなどへの適用が期待

金属3Dプリンタを駆使した異方性製品化 ～航空宇宙産業(タービンブレード)～

異方性カスタム化

高次結晶制御

傾斜化多結晶組織

鋳造法(従来法)
では制約が多い

High

耐熱温度

Low

【短中期】

方向制御

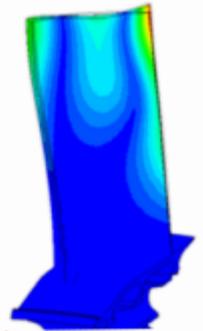
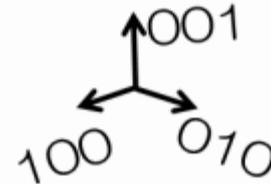
等方性

単結晶
一軸方位制御

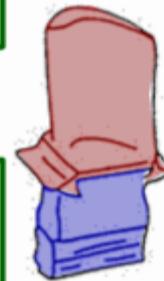
【中長期】

製造技術確立
→ 実機適用検証

高次結晶制御



単結晶翼：
三軸方位制御
→ 共振回避



翼部：粗粒
(耐クリープ)

翼根部：細粒
(耐疲労)

傾斜化多結晶組織

金属インプラント内の「原子異方性」制御 ～単結晶による低ヤング率化～

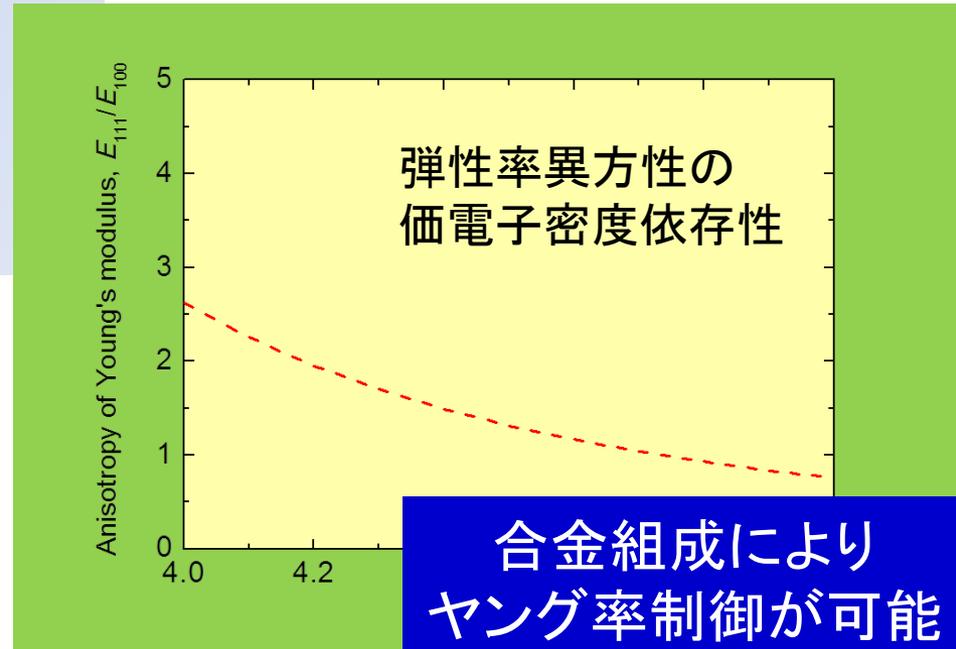
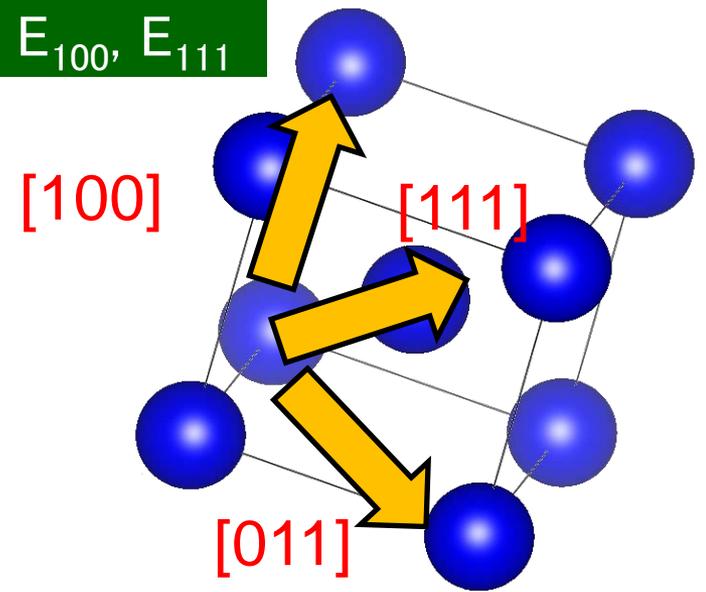
Bcc-Tiにおける<100>, <111>方向へのヤング率 E_{100} , E_{111}

$$E_{100} = \frac{(c_{11} - c_{12})(c_{11} + 2c_{12})}{c_{11} + c_{12}}$$

$$E_{111} = \left(\frac{c_{11} + c_{12}}{c_{11} + 2c_{12}} + \frac{1}{3} \left(\frac{1}{c_{44}} - \frac{2}{c_{11} - c_{12}} \right) \right)^{-1}$$

$$\frac{E_{111}}{E_{100}} = \left\{ 1 + \frac{3}{1/B + 3/c'} \left(\frac{1}{c_{44}} - \frac{1}{c'} \right) \right\}^{-1}$$

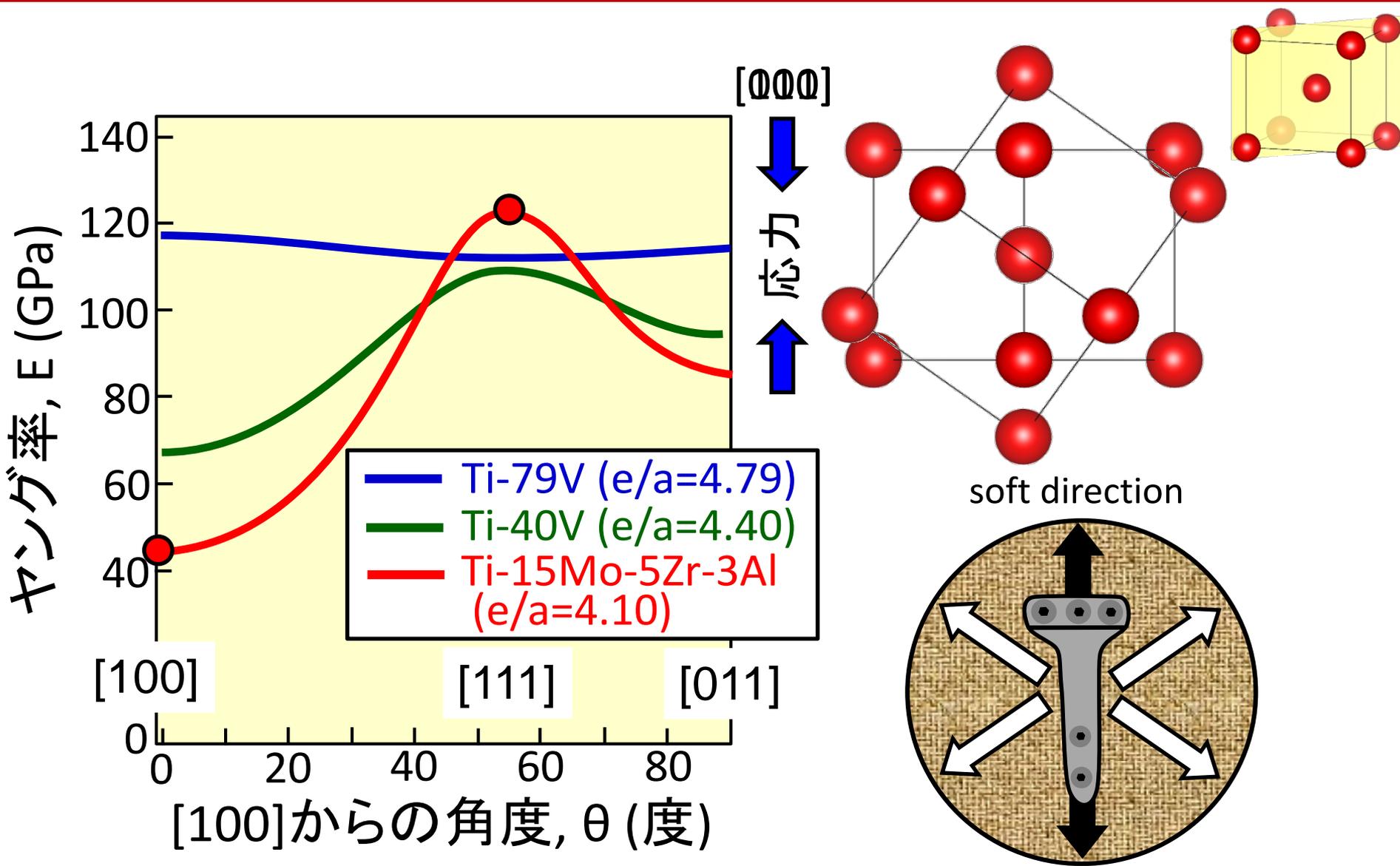
$c' = 1.391 \times (e/a - 2)^{3.34} / \text{GPa}$
 $c_{44} \sim 40 / \text{GPa}$
 $B = 123 \times (e/a) - 480 / \text{GPa}$



$$E_{111}/E_{100}(\uparrow) = f(B, c') = g(e/a(\downarrow))$$

異方性骨を積極誘導・維持する異方性インプラント設計指針 25

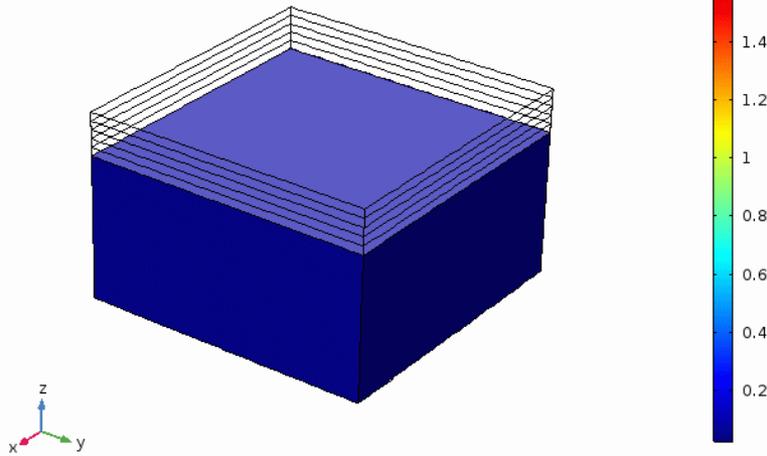
～原子異方性制御による低ヤング率化～



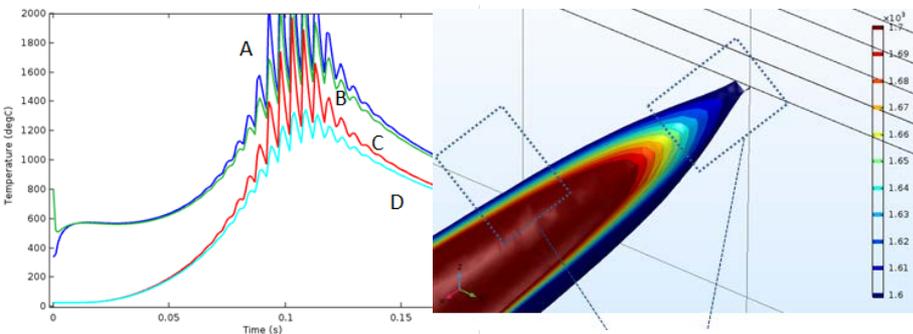
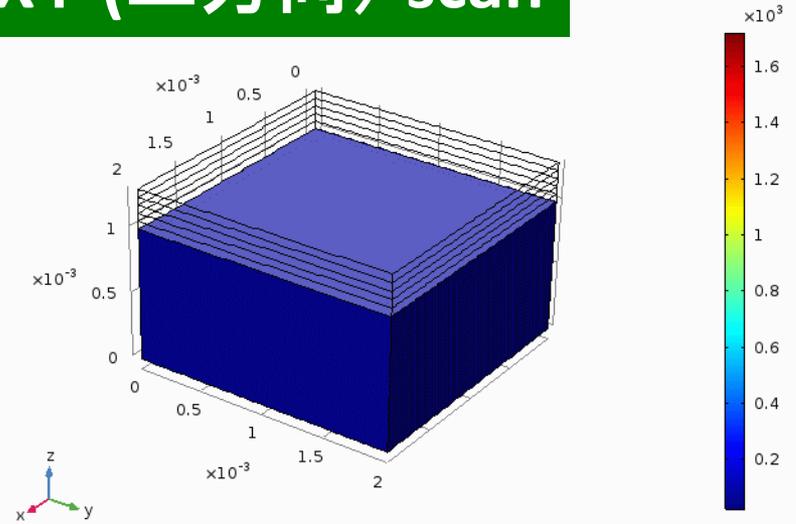
結晶方位によりヤング率を制御可能！

造形体異方的機能制御のための溶融池シミュレーション

X (一方向) scan



XY (二方向) scan

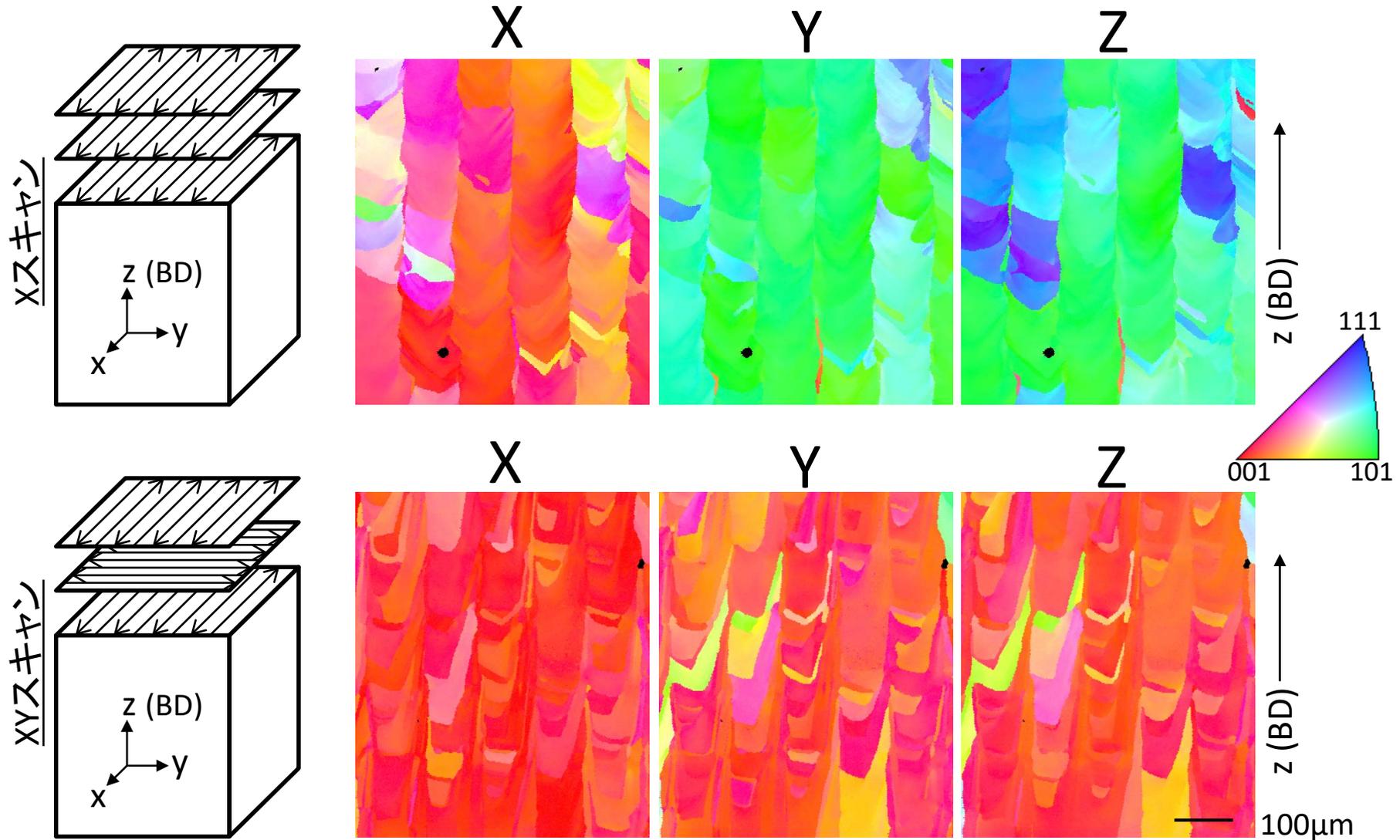


造形中におけるビームスキャン条件
に応じた温度分布,
組織制御シミュレーション



溶融池形成による結晶方位制御

低弾性化のためのスキャンストラテジーの制御による異方性原子配列制御に成功



◎順シミュレーション・逆問題解析

レーザ積層造形法による
Inconel718合金の組織設計と制御

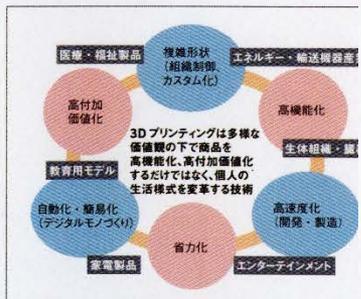
8-7. 3D プリンティング

□ 市場トレンド

3Dプリンティング(additive manufacturing: AM) 3Dプリンターのみならず、使用する材料、ソフトウェアや関連サービスまでも含む付加製造による新たなづくりシステム全体を示す。個人の価値観は多様で世界的な経済構造の急激な変化、各国における年齢の変化や高齢化による労働者人口の減少が起きていくこうした状況に対応するには、これまでの大量生産消費から、カスタム化による高付加価値化、ユーの感性価値の可視化、工業製品や医療製品の高機能現を含め、省力化されたマスカスタムにより推進す術革新が不可欠となる。3Dプリンティングはこれ現代化する技術として期待され、多種多様な価値観の商品を高機能化、高付加価値化するだけではなく、者の生活様式や生活概念そのものをも変革するとしての役割まで果たす可能性を秘めている。

3Dプリンターは1970~1980年代に製品の3次元形状を切削加工のような引き算ではなく、原材料のすなわち足し算により制御する手法として考案された。その後、樹脂を中心とした地道な研究開発が進められ、2000年代に入ってから3D-CAD技術の普及、2009米国試験材料協会(ASTM)による7種類の3Dプリン分類規格、2013年の当時のObama米大統領による一般教書演説での「3Dプリンターによる新しいモノづくり概念の可能性」への言及が3Dプリンティングブーム付け役となった。当初は単なるブームにすぎないと

図1 3Dプリンティングの特長と進化する製品群



(筆者が作成)

共通基盤技術としては、ハイエンド3Dプリンティングは、材料、製造技術共に造形品の高品質化のためのモニタリング技術を獲得していくとともに、Society 5.0で目指す情報科学技術を駆使した設計段階での高機能性の担保が不可欠となる。同時に、それを可能とする3D-CAD/CAEに関する高度な専門技術を持つ技術者の養成が不可欠になる。汎用機については、一般ユーザーが3D設計・製造可能なユーザビリティが高く、ユーザーの潜在価値、感性価値をも引き出すことを可能とする高機能化ソフトの開発が必須である。3Dプリンティングは単なる3D造形物の製造手段にとどまらず、新しい価値創成やライフスタイルの向上にまで踏み込んだ未来型システムの構築ツールとなることが期待される。

ングが市場を牽引している。

一方で、新・産業革命はIoT(Internet of things)やピッ

グデータ利用(マテリアルズインフォマティクスなど)、

の高い成長予測を象徴している。

術トレンド

品トレンドの進化は、樹脂、セラミックス、金属、生薬や臓器の製造にまで広がった各種3Dプリンティング技術の深化と関連技術レベルの底上げにより達成。3Dプリンター技術そのものは、新方式や複合化(チビーム化や切削加工との組み合わせなど)が出発され、造形の高速度化・大型化に加え、製品機設計段階で予測するための蓄積データ活用や定式自動化が今後進むことが期待される。その際、金属3Dプリンティングでは、溶接・接合・焼結の3D化技術で捉えることで、既存学理の下、新規の技術基盤を打つ必要がある。

技術において大きな柱となるのは、3D向け材料とAD/CAM/CAEソフト、さらには半導体分野にもいる設計と製造の分離である。原材料は多様化され、化されるとともに、3Dプリンティングならではの性を発揮するような粉末、フィラー、インクなどのに加え、量産化、低コスト化技術も必須となる。

イオ3Dプリンティングにおいては、細胞3D配列化のための細胞、タンパク質のプリンティング制御、用3D生体組織・臓器の造形、医薬品評価用ハイスペック3D生体組織/臓器モデル製造、安全性評価な研究技術開発が同時並行で進むものと予想される。

基盤技術としては、ハイエンド3Dプリンティング技術を獲得していくとともに、Society 5.0で目指す情報科学技術を駆使した設計段階での高機能性が不可欠となる。同時に、それを可能とする3D-CAD/CAEに関する高度な専門技術を持つ技術者の養成が不可欠になる。汎用機については、一般ユーザーが設計・製造可能なユーザビリティが高く、ユーザーの潜在価値、感性価値をも引き出すことを可能とする高機能ソフトの開発が必須である。3Dプリンティングによる3D造形物の製造手段にとどまらず、新しい価値やライフスタイルの向上にまで踏み込んだ未来型システムの構築ツールとなることが期待される。

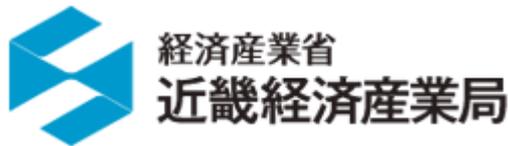
て成長しつつある。米General Electric (GE) 社の金属3Dプリンターメーカーの相次ぐ買収は、この分野の今後

参考文献

1) [2016年版 3Dプリンター市場の現状と展望]、矢野経済研究所、2016年11月

御清聴ありがとうございました

This work was partly supported by the Grants-in-Aid for Scientific Research (S) from the Japan Society for the Promotion of Science (JSPS) and the Funds for Integrated Promotion of Social System Reform and Research and Development, the Support Program to break the bottlenecks at R&D System for accelerating the practical use of Health Research Outcome from the Japan Science and Technology Agency (JST) and SIP (Cross-ministerial Strategic Innovation Program) from NEDO. T. Nakano thanks the Iketani Science and Technology Foundation for partially supporting this research.



JAPAN SOCIETY FOR THE PROMOTION OF SCIENCE
日本学術振興会



国立研究開発法人
科学技術振興機構
Japan Science and Technology Agency



国立研究開発法人
新エネルギー・産業技術総合開発機構