添付資料３

報告書

医療機器に関する国際標準化（ISO/TC 150）
Additive Manufacturing による生体用構造物の
特性評価方法に関する国際標準化調査

2024 年 3 月 22 日

一般社団法人
日本ファインセラミックス協会

表紙裏

目次

第 1 章　事業の目的と調査 1
事業目的 1
事業内容 1
調査事業のアプローチ 2
第 2 章　ISO と国際標準化 4
ISO とは 4
ISO の組織体制 4
ISO 戦略 5
ISO 2023 統計 8
ISO 規格の開発手順 10
医療機器セクターにおける ISO 政策 11
第 3 章　ISO/TC150・ISO/TC261・ISO/TC106 の概要 16
【ISO/TC150 について】 16
DIN（ドイツ規格協会）とは 18
【ISO/TC261 について】 21
【ISO/TC106 について】 26
第 4 章　積層造形市場動向に関する国内外調査 30
（国内調査～グローバルセラミックス積層造形材料市場～） 30
A：調査目的 30
B：調査内容 30
第 1 節：セラミックス積層造形材料の市場概要 31
第 2 節：会社別グローバルセラミックス積層造形材料の市場競争 44
第 3 節：地域別グローバルセラミックス積層造形材料の市場概要 52
第 4 節：用途別セラミックス積層造形材料の市場概要 56
第 5 節： 北米 国別のセラミックス積層造形材料の市場規模 68
第 6 節： 欧州 国別のセラミックス積層造形材料の市場概要 71
第 7 節： アジア太平洋 国別のセラミックス積層造形材料の市場概要 74
第 8 節： 南米 国別のセラミックス積層造形材料の市場概要 77
第 9 節：中東・アフリカ 国別のセラミックス積層造形材料の市場概要 80
第 10 節： 川上、市場動向の分析 82
第 11 節：セラミックス積層造形材料の ASTM および ISO 規格 85
第 12 節：調査結果と結論 87
（海外調査～出張報告～） 89
１． 韓国出張 89
２． シドニー出張 98
３． 欧州・米国出張 104
４． ICACC2024 報告 109
第 5 章　研究調査 161
1.国立研究開発法人物質・材料研究機構(NIMS)における調査研究 161

研究の目的 161
実施内容 161
考察 165
2.東北大学　流体科学研究所における調査研究 165
研究の目的 165
実態調査 166
実施内容 169
考察 174
3.大阪大学における調査研究 175
研究の目的 175
実施内容 176
考察 182
参考文献 182
第 6 章　まとめ～日本が策定すべき国際標準～ 183
ISO/TC150 で日本が目指す標準化 183
研究調査を通して見えてきた方向性 185
さいごに 186

第 1 章　事業の目的と調査

事業目的

本事業では、医療機器分野における国際標準化活動を推進し、先行主導的な国際標準の獲得や日本企業による開発製品の国際競争優位を獲得することを目的として、必要となる各種調査研究等を実施する。

事業内容

国際競争上、重要な国際標準活動（本邦発の国際標準提案、薬機法で引用される JIS と対応する国際規格への日本意見反映等）を行う医療機器関連の ISO 及び IEC の技術委員会（TC）に参画している国内委員会（国内審議団体）に対して、必要な経費（審議参加国への対応に係る調査研究、国内委員会の開催経費、国際会議への参加経費、国際標準形成過程で必要な追加データ取得等の経費等）を支援し、本邦主導で国際標準を確保するための基礎検討や国内外 Interlaboratory test による標準作成に必要な科学的根拠の確保を推進し、我が国の医療機器産業活性化に資する各種検討体制構築に繋げる。

今回、支援対象とする ISO/TC 150「外科用インプラント」の国内審議団体である日本ファインセラミックス協会は、当該 TC に対する国内委員会や標準化委員会を設立し本邦発の国際標準化獲得活動を行っているが、今回の支援により以下の各種調査研究等を実施する。

ISO/TC 150（外科用インプラント）の関係分野において、Additive Manufacturing（3D プリンティング）や有限要素シミュレーションのデジタルマニュファクチャリングが医療機器分野で進められているが、これらのデジタル技術評価に対する国際規格化がまだ進んでいない状況である。新しい機器に対し逐次新しい評価体系が要求される中、日本製品の機能・特性の優位性を定量的に明確化し、製品品質による競争力強化につながるバイオセラミックス評価に関わる規格体系について、各企業は技術進展に追随した規格開発を強く求めており、これに応える必要がある。

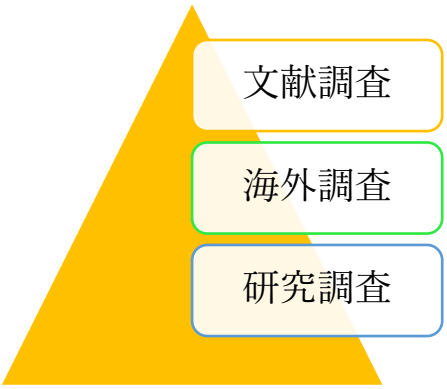
また、ISO/TC 150 の国内審議団体として、米国や欧州の医療機器関係者との更なる連携・協調、さらには中国、韓国などの近隣諸国とアジア連合を組んで欧米勢力に対抗できる体制作りが重要と考えている。このため関係国を訪問し、本分野における今後の国際標準化の動向や課題について調査分析を行い、今後の国際標準化への取り組みについて調査分析を行う。

以上の背景から、本事業において、「Additive Manufacturing による生体用構造物の特性評価方法に関する国際標準化調査」を実施することで、この分野で標準化すべき試験方法や標準化するための課題を明らかにすることが重要と考え、当調査を実施する。

調査事業のアプローチ

医療機器分野における国際標準化活動の強化を図る調査を行うアプローチとして、（１）文献調査、（２）海外調査、（３）研究調査の３段階で分析を行い、（４）報告書の作成を行う。

このため JFCA に BRIDGE 事務局を設け、関係大学や国立研究所等の支援を得て調査を開始し、国際標準開発の重要性、海外との比較による日本の現状が把握しやすいような報告書作成を目指す。また、国際規格開発に必要な試験を大学と国立研究所へ依頼し、TC150（外科用インプラント）の日本提案作成を支援する。



（１）文献調査

Additive Manufacturing による生体用構造物に関する産業動向について、調査会社による委託調査を実施する。

（２）海外調査

＜米国＞

○アメリカセラミックス学会（ICACC）への参加　デイトナビーチ

○TC150 米国主要団体訪問：NIST（米国国立標準技術研究所）ゲイザースバーグ

＜欧州＞

○TC150 国際幹事国訪問：DIN（ドイツ規格協会）ドイツ・ベルリンおよびプフォルツハイム

○TC150 英国国内審議団体訪問：BSI（英国規格協会）英国・ロンドン

＜韓国＞

○TC150 関係者面談：KIMS（韓国材料科学研究所）釜山

○ISO/TC261 ASTM F42 合同会議（9/18-22　仁川）

＜オーストラリア＞

○ISO/TC106 総会（9/15-20　シドニー）

（３）研究調査

規格開発において必要な試験を実施するための機器を購入し、TC150 での日本提案作成を支援する。機器設置先は国立研究開発法人物質・材料研究機構とする。

本事業において以下３件の国際標準化を目指し、大阪大学・九州工業大学・東北大

学・国立研究開発法人物質・材料研究機構の各機関にて研究調査を行う。
①3 次元プリンタにより作製する well-designed 多孔質骨補填材料の構造正確性・機械的特性予測に関する国際標準化
②AM 造形セラミックス人工骨の形状評価と力学強度評価に関する国際標準化
③3 次元構造物の変形，表面形状および摩擦力の測定法に関する国際標準化(血管等管　　状構造体の変形および表面性状の国際標準化)

具体的な調査内容としては、

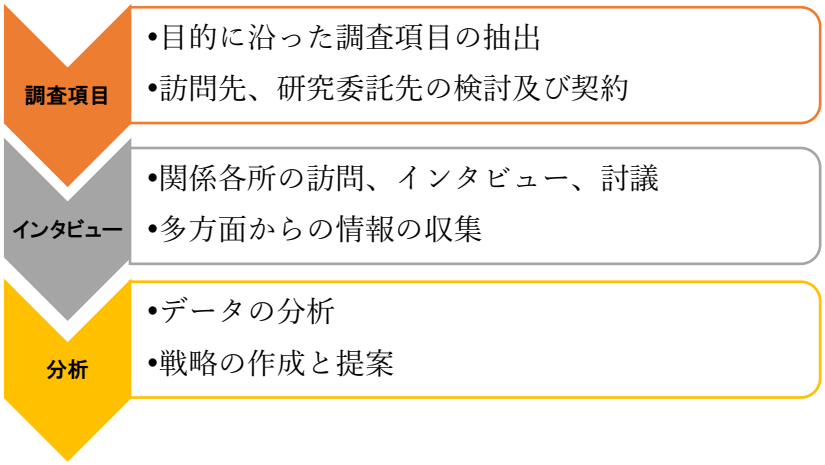
① 多孔質骨補填材料に使用される水酸アパタイト／コラーゲン骨類似ナノ複合体（HAp/Col）を利用し、Extrusion 式の 3 次元プリンタで設計された気孔構造を構築し、得られた材料の CT 像などを利用して得られた構造の正確さを測定あるいは検定する方法を確立するための検討。

② 複雑な形状を有する生体内へセラミックス製人工骨を埋め込むには、造形された人工骨の寸法・形状が設計時と一致する必要があるが、ファインセラミックスの AM 造形では造形・焼結による収縮が問題になるため、形状評価と力学的評価方法を確立するための検討。

③ 疾患モデルの形状構築には，3 次元プリンタが多く用いられるが、医療機器はモデルに接している状態で使用されるため、モデルの粘弾性や表面形状(摩擦)が医療機器の性能に影響を与えるにもかかわらず、構築したモデルの粘弾性や表面形状(摩擦)についての検証法の規格化がない。3 次元構造物の表面性状および粘弾性の評価方法を確立するための検討。

（４）報告書作成

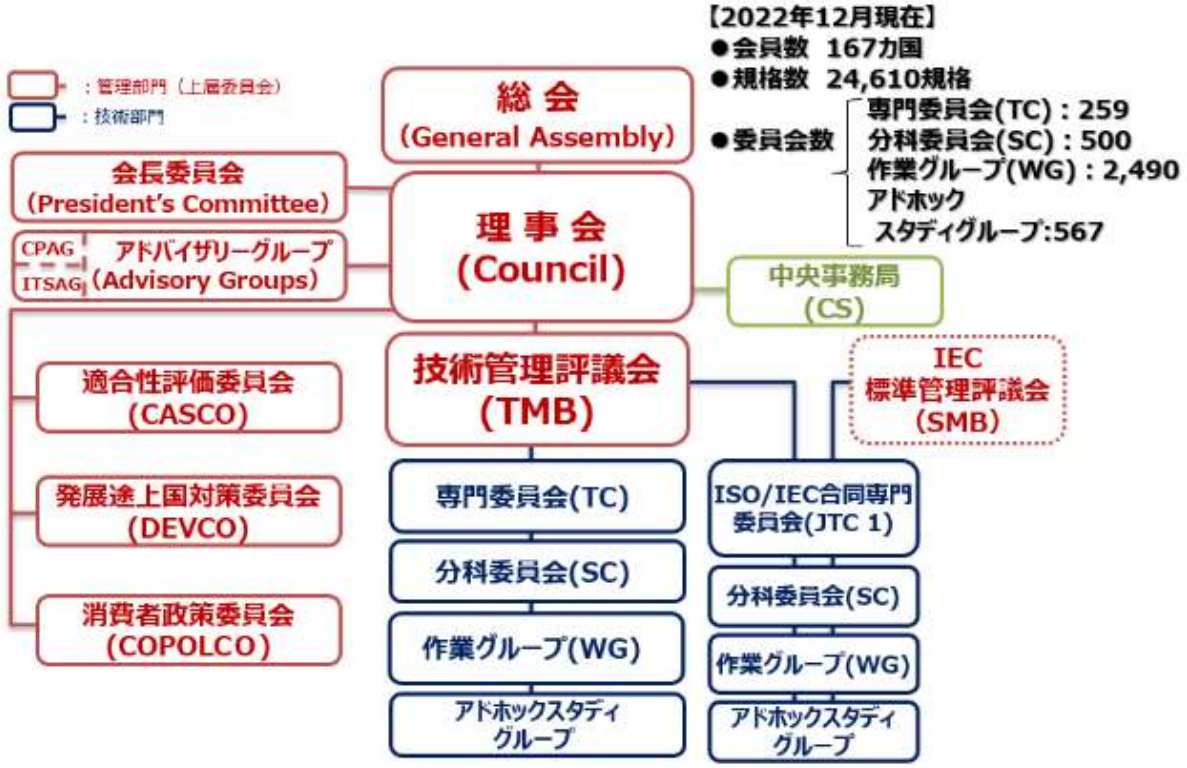
下記フローに従い日本の課題及び今後の在り方を検証、専門家でなくてもわかるよう必要に応じて説明を取り入れながら、報告書を作成する。



第 2 章　ISO と国際標準化

ISO とは

国際標準化機構（ISO）は、1947 年に 18 ヶ国により、国家間の製品やサービスの交換を助けて標準化活動の発展を促進し、知的・科学的・技術的・経済的活動における国家間協力を発展させることを目的に発足した。 ISO は 1 ヶ国 1 機関のみが会員となることができ、各国におけるもっとも代表的な標準化機関が加入する。日本においては閣議了解に基づき 1952 年から日本産業標準調査会（JISC）が加入している。



JISC（日本産業標準調査会） HP より（日本産業標準調査会：国際標準化(ISO/IEC)-ISO の概要 (jisc.go.jp) ）

ISO の組織体制

（１）総会(General Assembly)

組織の包括的な機関であり、究極の権威。メンバーとプリンシパルオフィサーが出席する年次総会である。

（２）理事会(Council)

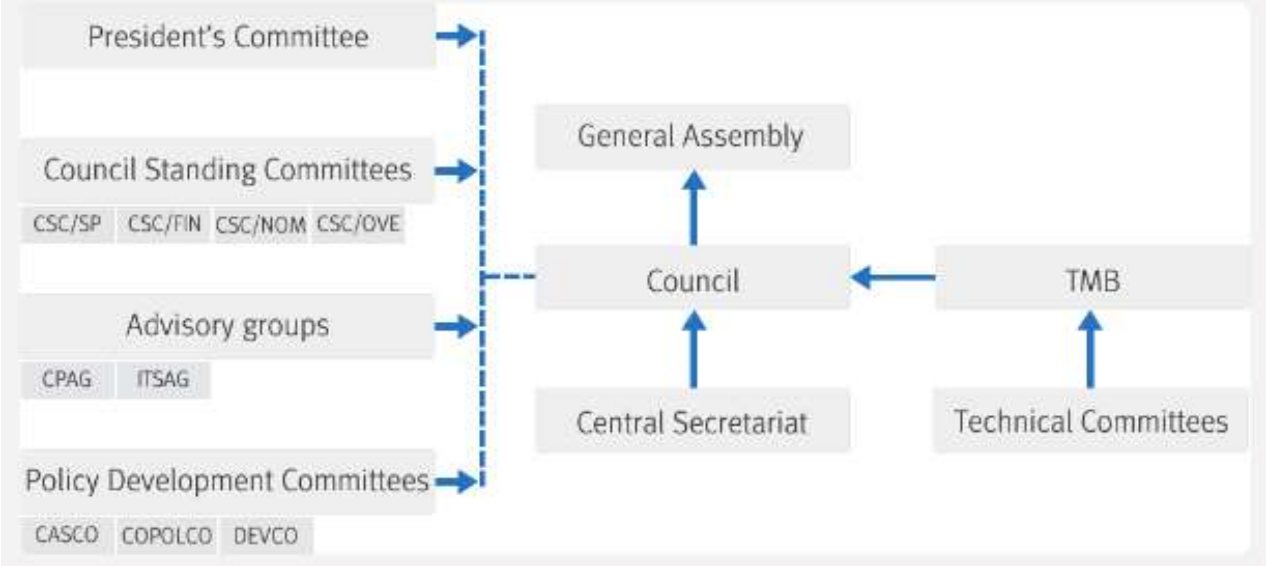
ISO 理事会は、ISO の中核的な統治機関であり、総会に報告する。年 3 回開催され、20 の加盟団体、ISO 役員、政策開発委員会 CASCO、COPOLCO、DEVCO の議長で構成されている。理事会は、理事会に報告する多くの機関に対する直接的な責任を持つ。

（３）技術管理評議会(TMB)

技術的な作業の管理は技術管理委員会が行い、理事会に報告する。この組織は、規格開発を主導する技術委員会と、技術的な問題に関して設立された戦略的諮問委員会にも責任を持つ。

（４）中央事務局(CS)

中央事務局は、総会、評議会、政策立案委員会およびその付属機関、技術管理委員会、参考資料委員会（REMCO）の事務局として活動している。



（５）役員(Principal officers)　カッコ内は任期













ISO HP より（ISO - Structure and governance）

ISO 戦略

私たちは、変化が絶え間なく起こり、挑戦と破壊がグローバルな規模で起こりうる世界で活動しています。このようなグローバルな状況の中で確固たる地位を築くために

は、私たちの目的と達成したいことを明確にし、同時に変化を予測し、私たちを取り巻く世界に迅速に適応できるような、明確で機敏な戦略が必要です。

この意味で、継続的な改善という概念は、目標が変化し、進化していくものである。しかし、今日の世界は昨日と同じではないし、明日も同じではない。ISO が前向きな変化の最前線に立ち続けることを確実にしたいのであれば、我々はさらに前進する必要がある。

このことを念頭に置き、ISO 戦略 2021-2030 は、ビジョン（なぜ私たちが何をするのか）、ミッション（何をどのように行うのか）、目標（ミッションとビジョンを実現するために達成すべきこと）、優先事項（これを実現するためにリソースを集中すべき場所）を定めています。これらの優先順位は、外部環境の変化に対応するために定期的に見直され、必要に応じて調整されるように設計されています。

私たちは 2030 年を、これまでの歩みを振り返り、組織としての基本的な取り組みを評価するための節目と定義しています。この時間枠は、国連の野心的な「2030 年に向けたグローバル・アジェンダ」と一致しており、17 の「持続可能な開発目標」を通じて概説されているように、実現には国際的な協力努力が必要となります。ISO は、協調の精神に基づき、標準化が私たちの世界を持続可能なものに変える上で重要な役割を果たすと考えています。

ISO 会長からのメッセージ（2020-2021 年）

私たちの新しい戦略について

会員、パートナー、全てのステークホルダーが協力して作り上げた新しい ISO 戦略 2030 を皆様にお伝えできることを嬉しく思います。製品やサービスに対する包括性と共通の合意を見出すことは、標準化の生命線であり、75 年間、ISO はこのプロセスの中心となってきました。従って、2030 年に向けた ISO のビジョンが同じ信条に基づくものであることは、ふさわしいことです。

ISO 戦略 2030 は、私たちの国際規格と同様に、定期的に見直され改訂される予定です。このようにして、私たちは、変化する環境と願望に沿って私たちの意図と行動を適応させながら、この戦略が目的に適ったものであり続けることを確実にするのです。この戦略は、目標や優先事項に向けた具体的な行動の概要を示す「実施計画」と、進捗状況を継続的に測定するための「測定フレームワーク」という 2 つの重要な運営ツールによって補完されます。

現在進行中の世界的な健康危機は、人類が直面している問題の真に普遍的な性質を示し、私たちの仕事に新たな視点をもたらしてくれました。私は、ISO が、グローバルな解決策を提供するための協調的な行動を支援し、私たちが今日置かれているような将来の状況に対して世界がよりよく備えるために、不可欠な役割を担っていると信じています。私たちは、社会、特にデジタル技術を利用した遠隔学習や仕事において、大きな変化が加速していることを目の当たりにしています。デジタルトランスフォーメーション、そして新しい働き方とソリューションの提供の必要性は、読んでの通り、私たちの新しい ISO 戦略を貫いているものです。

私たちの組織の目的を実現することが、私たち自身の成功よりもはるかに大きな意味

を持つことは、かつてないほど明確になっています。それは、世界中のすべての人々の生活をより簡単に、より安全に、より良くするという私たちのビジョンを実現することなのです。次のページで紹介する私たちの大胆なビジョンとミッションは、私たちの目的と信念の強さを明確に示しており、それらは国連の 2030 年グローバルアジェンダとその 17 の持続可能な開発目標にうまく合致しています。
ISO 戦略 2030 は、私たちを成功への重要な旅に導いてくれるのです。
Eddy Njoroge（エディ・ジョロゲ）
ISO HP より（ISO - Message from the ISO President (2020-2021) ）
＊DeepL 翻訳＊

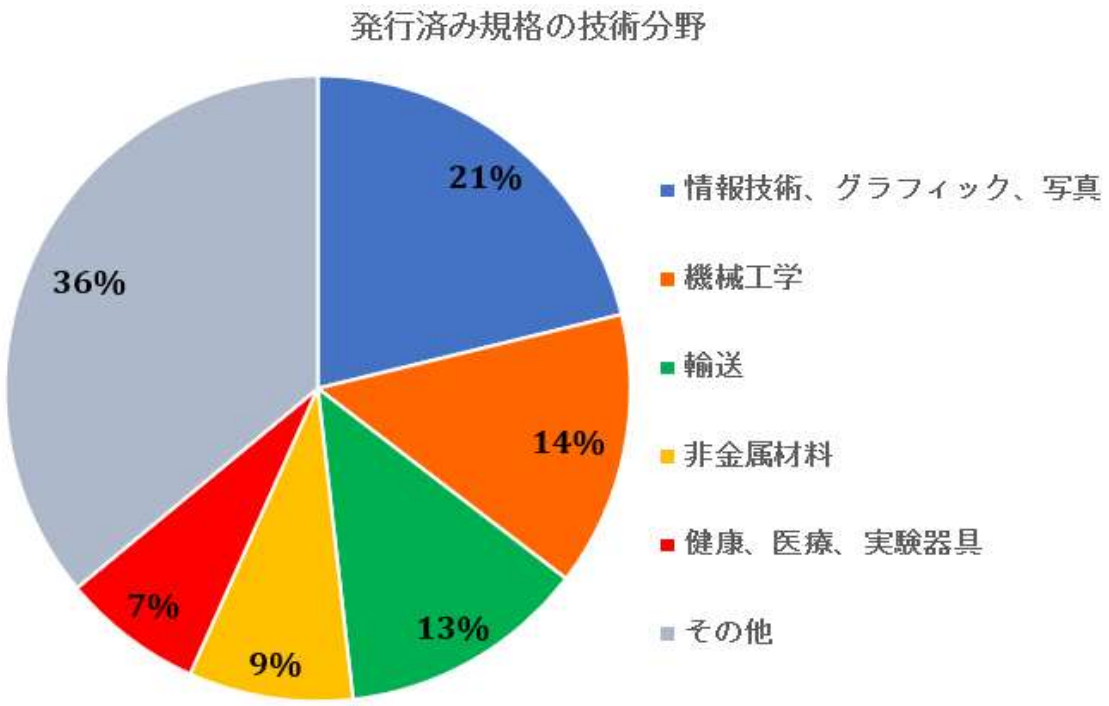


ISO 2023 統計

【メンバー】
国家標準化団体：169
加盟団体 ：127

【技術委員会構成】
技術委員会：3,954
専門委員会：268
小委員会：498
ワーキンググループ（WG および JWG）：2,506
サブグループおよびアドホック研究グループ：631
さらに、政策策定委員会、外部標準化団体（CASCO、COPOLCO、ISO/TMBG、CIE、IULTCS、IIW）を含む 51 の組織が、専門委員会組織を構成している。

【発行済み規格もしくはそれに準ずる文書】
2023 年 12 月時点　25,111 件
2023 年に発行された規格　1,465 件

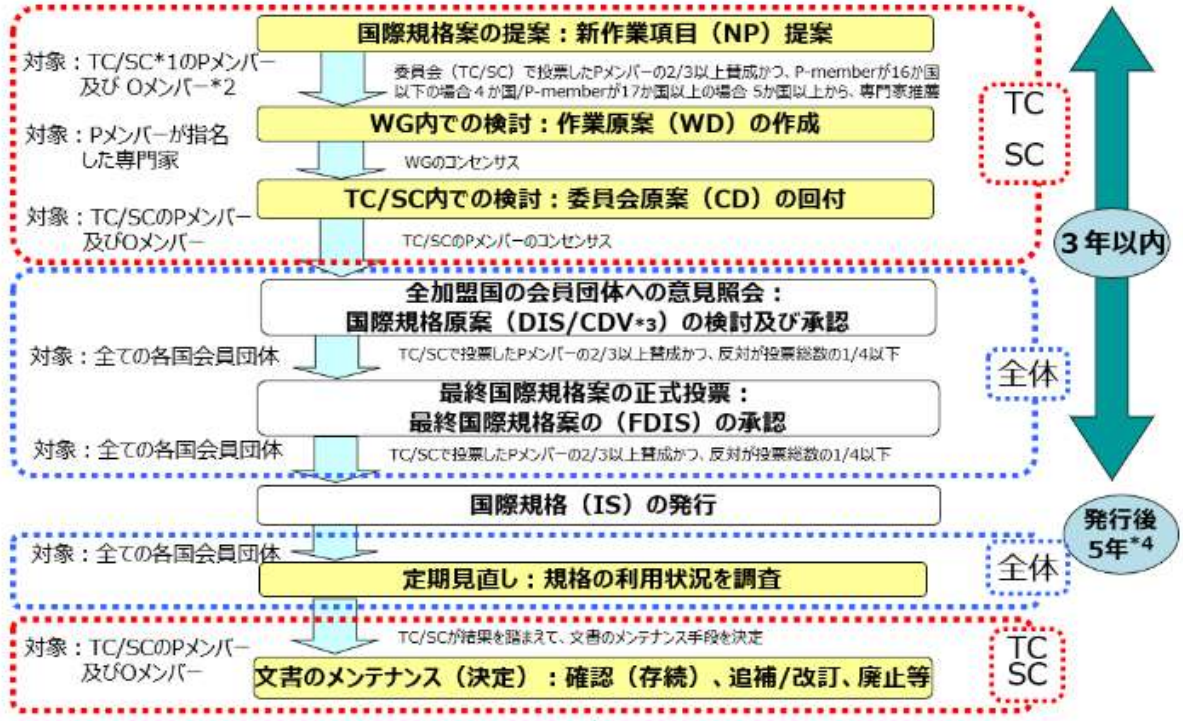


【メンバー各国による ISO 規格開発に対する貢献】

ISO Member	TC/SC 幹事国数	WG/JWG コンビーナ数
Algeria [IANOR]	0	1
Argentina [IRAM]	1	5
Australia [SA]	23	57
Austria [ASI]	3	18
Belarus [BELST]	0	1
Belgium [NBN]	5	21
Brazil [ABNT]	3	11
Canada [SCC]	18	89
Chile [INN]	0	2
China [SAC]	81	292
Colombia [ICONTEC]	1	5
Cyprus [CYS]	0	1
Czech Republic [UNMZ]	0	4
Denmark [DS]	5	19
Egypt [EOS]	0	1
Estonia [EVS]	0	1
Finland [SFS]	2	15
France [AFNOR]	82	220
Germany [DIN]	133	367
Iceland [IST]	0	2
India [BIS]	11	18
Iran, Islamic Republic of [INSO]	5	17
Ireland [NSAI]	0	6
Israel [SII]	3	16
Italy [UNI]	23	57
Jamaica [BSJ]	1	0
Japan [JISC]	81	228
Kazakhstan [CTRM]	0	1
Kenya [KEBS]	1	2
Korea, Republic of [KATS]	22	117
Luxembourg [ILNAS]	0	5
Malaysia [DSM]	3	9
Mexico [DGN]	0	1
Netherlands [NEN]	9	63
New Zealand [NZSO]	0	5
Norway [SN]	7	35
Peru [INACAL]	0	1
Philippines [BPS]	0	3
Poland [PKN]	2	1
Portugal [IPQ]	1	6
Qatar [QS]	0	1
Russian Federation [GOST R]	7	5
Rwanda [RSB]	0	1
Saudi Arabia [SASO]	1	2
Senegal [ASN]	1	0
Singapore [SSC]	0	3
Slovenia [SIST]	0	1
South Africa [SABS]	11	10
Spain [UNE]	6	19
Sweden [SIS]	26	48
Switzerland [SNV]	19	34
Thailand [TISI]	0	5
Trinidad and Tobago [TTBS]	0	1
Türkiye [TSE]	2	2
Uganda [UNBS]	1	2
Ukraine [SE UkrNDNC]	1	1
United Kingdom [BSI]	75	229
United States [ANSI]	93	416

ISO 規格の開発手順

（１）規格開発の流れ ISO 規格は、通常以下の段階を踏んで作成され、3 年以内に国際規格の最終案がまとめられる。また発行後は見直しが行われる。ISO の場合は、発行後 5 年で定期見直しが行われ、IEC の場合は、規格毎に決められた見直し期間内に見直しが行われる。



＊1 TC…技術委員会 Technical Committeeの略 ＊2 P メンバー：積極的参加(Participating) メンバー ＊3 ISOの場合はDIS、IECの場合はCDV。
SC…分科委員会 Sub Committeeの略 O メンバー：オブザーバー(Observer) として参加するメンバー
＊4 IECの場合は、規格毎に決められた見直し期間内に見直し

（２）国際文書の種類

ISO/IEC が発行する文書には、主に以下の種類がある。

ISO/IEC出版物	内容	説明	コンセンサスレベル	発行時の承認要件
IS（国際規格）International Standard	規範	国際的な標準化機関によって採択された、公に利用可能な文書。発行後5年で見直しが*4 行われる。	全ISO/IEC会員	投票したPメンバーの2/3以上の賛成 かつ投票総数の1/4以下の反対
TS（技術仕様書）Technical Specification	規範	将来的にISとして合意される可能性はあるが、現時点ではISとして承認されるための必要な支援が得られていない等の文書。発行後3年で見直しが行われる。	TC/SC	投票したPメンバーの2/3以上の賛成
ISO-PAS*5（公開仕様書）Publicly Available Specification	規範	緊急の市場ニーズに対応するため、IS発行前に、予備的な文書が必要である場合等に発行する文書。発行後3年で見直し行われ、最長6年で廃止される。	TC/SC	投票したPメンバーの過半数の賛成
IEC-PAS*5（公開仕様書）Publicly Available Specification	規範	緊急の市場ニーズに対応するため、主に、IECの外部組織が策定した既存規格文書をIECが発行する文書。 備考：PASが既存のISと矛盾することは許されない。同一のテーマに関して、競合するPASは認められる。	TC/SC	投票したPメンバーの過半数の賛成
TR（技術報告書）Technical Report	参考	一般にISまたはTSとして発行される文書とは異なる種類の収集データを含めた文書。見直しの規定はない。	TC/SC	投票したPメンバーの過半数の賛成
Guide（ガイド）	参考	国際標準化に関する事項、主に、規格類の開発についての方向付け、アドバイスまたは推奨事項を示した文書。	全ISO/IEC会員	反対票がISO/IEC会員団体の有効投票総数の1/4以下

＊5 JTC1-PASは、ISO/IEC-PASとは異なり、指定された外部組織が策定した規格をISO/IEC規格として出版するプロセスをいう。

ISO 独自の文書には、主に以下の種類がある。

ISO出版物	内容	説明	コンセンサスレベル	発行時の承認基準
IWA（国際ワークショップ協定）International Workshop Agreement	規範	関心のある人たちで集ってワークショップを開催し、発行する合意文書。発行後3年で見直しがあり、最長で6年間存続させることができる。	ワークショップ	ワークショップ参加者のコンセンサス

IEC 独自の文書には、主に以下の種類がある。

IEC出版物	内容	説明	コンセンサスレベル	発行時の承認基準
SRD（システム・リファレンス・デリバラブル）	規範	SyC*6　が作る配布物で、当該SyC分野の規格の仕様及び適用についての指針を示す文書。見直しはISに準ずる。	SyC	投票したPメンバーの2/3以上の賛成

*6 SyC･･･システムズ委員会 System Committeeの略

JISC（日本産業標準調査会）HP 引用

日本産業標準調査会：国際標準化(ISO/IEC)-ISO 規格の制定手順 (jisc.go.jp)

医療機器セクターにおける ISO 政策

〇医療機器セクター

植込み型心臓ペースメーカーから車椅子、診断検査システムから注射器や針に至るまで、様々な製品を扱う医療機器業界は、急速に発展していると同時に、高度な規制を受けている。

規格は、新しい医療機器技術の迅速な導入を可能にする一方で、医療機器が安全に使用でき、意図したとおりに機能し、リスクを上回る利益を患者にもたらすという一般の人々や規制当局の期待に応えるために重要な役割を担っている。

主な特徴は以下の通り。

・医療機器規制の枠組みにおける重要な要素としての規格の受け入れ：義務ではないものの、規格はメーカーに特定の規制要件への適合を推定させるものである。

・国際規格の開発には、医療機器メーカーや専門ユーザーとともに、規制当局も参加している。

・IEC、ISO、CEN、CENELEC、WHO および国際的な規制調和イニシアティブとの緊密な協力により、実用的で効果的かつ準拠した医療機器規格を開発する。

〇誰が関わっているのか？

医療機器分野には、メーカー、規制当局、医療従事者、臨床医、患者など、多くの関係者が関与している。安全性を促進し、患者の転帰を向上させる規格を作成するには、すべての利害関係者の代表者が参加することが不可欠である。ISO と IEC は、他の規格開発者とともに、利害関係者が協力してこれらの目標を達成する規格を開発する場を提供し、世界各地で実施されている様々な規制の枠組みへの準拠を支援していく。

○国際医療機器規制協議会（International Medical Device Regulators Forum）
International Medical Device Regulators Forum (IMDRF) は、規制要件と実務の国際的な収束を促進することを目的とした、各国の規制当局の組織である。機器の安全性、性能、有効性、品質に関する規制の調和を促進し、医療機器規制制度が確立されている国の経験から、開発中の国が恩恵を受けるための情報交換の場として機能することを目的としている。

○各国の医療機関
医療機器規制を調和させ、共通の規制システムに収束させる IMDRF のイニシアティブにもかかわらず、医療機器の規制は依然として国家レベルで行われている。どの国も、医療システムの側面を監督し、規制する権限を持つ政府機関を一つ以上指定している。医療機器に関する規制活動には、医療機器の開発、製造および流通の規制、商業的流通前の承認、医療機器の安全性および性能に関する市販後の監視が含まれる。

○欧州標準化委員会&欧州電気技術標準化委員会
欧州標準化委員会（CEN）および欧州電気技術標準化委員会（CENELEC）は、EN 規格の開発を担当する組織である。EN 規格は、医療機器の要件を規定するものを含む、欧州連合の指令や規制への適合を推定させることが可能。CEN と CENELEC は、ドレスデン協定とウィーン協定に基づき、ISO と IEC と正式に協力し、全世界で適用可能な規格を開発し、国際貿易を促進している。

○世界保健機関（WHO）
世界保健機関（WHO）は、国連システムにおける保健分野の指揮・調整機関である。WHO は、グローバルな健康問題に対するリーダーシップの発揮、健康研究課題の形成、規範と基準の設定、根拠に基づく政策オプションの明示、各国への技術支援の提供、健康動向の監視と評価などの役割を担っている。WHO の専門家は、カテゴリーA のリエゾンとして、以下に挙げる委員会を含む 45 の ISO 専門委員会の作業に積極的に参加している。
ISO および IEC 委員会
ISO および IEC の多くの技術委員会および分科会は、医療機器の規制において重要な役割を果たす規格を開発している。その中には以下 TC が含まれる。
IEC/TC 62：医療用電気機器
IEC/TC 66： 測定機器、制御機器、実験用機器の安全性
IEC/TC 87：「超音波」。
ISO/TC 76： 輸血、輸液、注射、医療・製薬用血液処理機器
ISO/TC 121：麻酔及び呼吸器用機器
ISO/TC 150：外科用インプラント
ISO/TC 168：補綴物及び装具
ISO/TC 170：手術用器具
ISO/TC 172/SC 5「顕微鏡及び内視鏡

ISO/TC 172/SC 7「眼科用光学機器及び器具
ISO/TC 194：医療機器の生物学的評価
ISO/TC 198：ヘルスケア製品の滅菌
ISO/TC 210：医療機器の品質管理及び対応する一般的側面
ISO/TC212：「臨床検査試験及び体外診断試験システム



これらの規格の多くは、IEC の適合性評価システム「IECEE-CB 国際試験認証発行のためのスキーム」に基づいて発行されている。

〇この分野での規制協力はどのように実現されているか
世界貿易機関（WTO）の貿易の技術的障害に関する協定に沿って、いくつかの国や地域の医療機器規制当局は、規制をサポートするために国際標準を利用している。その利用において規格は通常強制的なものではないが、特定の規制要件への適合を推定させるものである。国際規格の開発に医療機器メーカーやユーザーとともに規制当局が参加し、ISO/IEC と他の機関が医療機器規格の開発で緊密に協力することが求められる。
その結果として多くの ISO および IEC 規格が、現在、医療機器規制当局によって世界的に認知されているのだ。例えば
IEC 60601 シリーズは、医療用電気機器の基本的な安全規格として
IEC 62366 は、機器の最適なユーザービリティを達成し、検証するためのプロセスモデルとして
ISO 13485 は、規制当局から承認された医療機器を一貫して提供することを実証するための品質システム要件適合性を確立するものとして
ISO 10993 シリーズは、医療機器に使用される材料の生物学的安全性と適合性を実証するためのグローバル規格として
ISO/TC 198 は、ヘルスケア製品の無菌性を保証するための滅菌規格として
ISO/TC 210 と IEC SC 62A が共同で作成した ISO 14971 は、医療機器リスクマネジメントプロセスのベンチマークとして
医療機器業界は高度な規制を受けているが、規制要件を満たすための共通のアプローチに各国が合意することで、貿易障壁が低減され、世界中のメーカーによる受益に繋がっている。
ISO HP より（Medical devices (iso.org)）

○医療機器関係ＩＳＯ／ＴＣ国内審議団体

２０２４年２月時点

TC No。	分野	国内審議団体	所在地	TEL
TC 76	輸血、点滴機器、注射器	一般社団法人 日本医療機器テクノロジー協会 （旧　日本医療器材工業会）	〒102-0083 東京都千代田区麹町3-10-3	03-5212-3721
TC 84	注入用医療機器	一般社団法人 日本医療機器テクノロジー協会	〒102-0083 東京都千代田区麹町3-10-3	03-5212-3721
TC 106	歯科材料・機器	日本歯科材料器械研究協議会	〒111-0056 東京都台東区小島2-16-14	03-3851-8701
TC 121	麻酔および呼吸機器	日本医用機器工業会	〒113-0033 東京都文京区本郷3-39-15	03-3816-5575
TC 150	外科用インプラント	JFCA 日本ファインセラミックス協会	〒105-0011 東京都港区芝公園1-2-6　ランドマーク芝公園２F	03-3431-8271
/SC1	材料	日本ファインセラミックス協会	〒105-0011 東京都港区芝公園1-2-6	03-3431-8271
/SC4	人工関節及び人工骨	日本ファインセラミックス協会	〒105-0011 東京都港区芝公園1-2-6	03-3431-8271
/SC5	骨形成	日本ファインセラミックス協会	〒105-0011 東京都港区芝公園1-2-6	03-3431-8271
/SC7	再生医療機器	日本ファインセラミックス協会	〒105-0011 東京都港区芝公園1-2-6	03-3431-8271
/SC2	循環器系機器	一般社団法人 日本医療機器テクノロジー協会	〒102-0083 東京都千代田区麹町3-10-3	03-5212-3721
/SC6	能動型埋植医療機器	一般社団法人 日本医療機器テクノロジー協会	〒102-0083 東京都千代田区麹町3-10-3	03-5212-3721
TC 157	避妊具	日本コンドーム工業会	〒113-8710 東京都文京区本郷3-27-12	03-3817-4231
TC 168	人工装具及び支持具	一般社団法人日本義肢装具学会	〒 113-0033 東京都文京区本郷5-32-7	03-3812-9066
TC 170	外科機器	一般社団法人日本医科機器学会	〒113-0033 東京都文京区本郷3-39-15	03-3813-1062

TC172/SC5	顕微鏡及び内視鏡	日本顕微鏡工業会	〒105-0011 東京都港区芝公園 3-5-8	03-3432-5100
TC172/SC7	眼光学及び関連機器	日本医用光学機器工業会	〒103-0023 東京都中央区日本橋本町 3-1-11	03-6665-6923
TC 173	身体障害用技術システム	一般社団法人日本福祉用具・生活支援用具協会	〒105-0002 東京都港区愛宕 1-6-7　愛宕山弁護士ビル 2 階	03-3437-2623
TC 176	品質管理と品質保証	一般財団法人日本規格協会	〒107-8440 東京都港区赤坂 4-1-24	050-1742-6135
TC 194	医療機器の生物学的評価	一般社団法人 日本医療機器テクノロジー協会	〒102-0083 東京都千代田区麹町 3-10-3 神浦麹町ビル 3F	03-5212-3721
TC 198	ヘルスケア製品の滅菌	一般社団法人日本医科機器学会	〒113-0033 東京都文京区本郷 3-39-15	03-3813-1062
TC 210	医療機器品質保証など一般	一般社団法人日本医療機器産業連合会	〒162-0822 東京都新宿区下宮比町 3-2	03-5225-6234
TC212	臨床検査及び対外診断検査システム	公益社団法人日本臨床検査標準協議会	〒101-0047 東京都千代田区内神田 2-7-13	03-6206-9746

第 3 章　ISO/TC150・ISO/TC261・ISO/TC106 の概要

【ISO/TC150 について】



1971 年に設立された ISO/TC 150 は、治療や診断の目的で恒久的または一時的に体内に埋め込まれる非活性および活性の医療機器に関する規格を開発している。非活性型インプラントは、身体の磨耗した部分や損傷した部分の置換や修復あるいは審美的な回復や強化を目的とし、能動的なインプラントは、治療用の電気刺激を与えたり、生体信号を感知したりするものである。インプラントのヘルスケア市場は世界的で、規模が大きく、成長している。数百万人の患者に数千万個の器具が使用されており、高齢化によりその数はさらに増えると予想されている。

TC150 委員会の対象範囲には、完全な非能動および能動植込み型医療機器システム、ならびにその器具、 部品、材料が含まれる。

ISO/TC150 は 24 の参加メンバー（P メンバー）と 22 のオブザーバーメンバー（O メンバー）を擁し、2024 年 2 月時点までで 175 の国際規格を開発してきた。現在の規格範囲を維持し、満たされていないニーズに対応するための新規格を開発する責任を担っている。



ISO/TC150 規格は、安全性、品質、寿命、機能的性能について規定している。その目

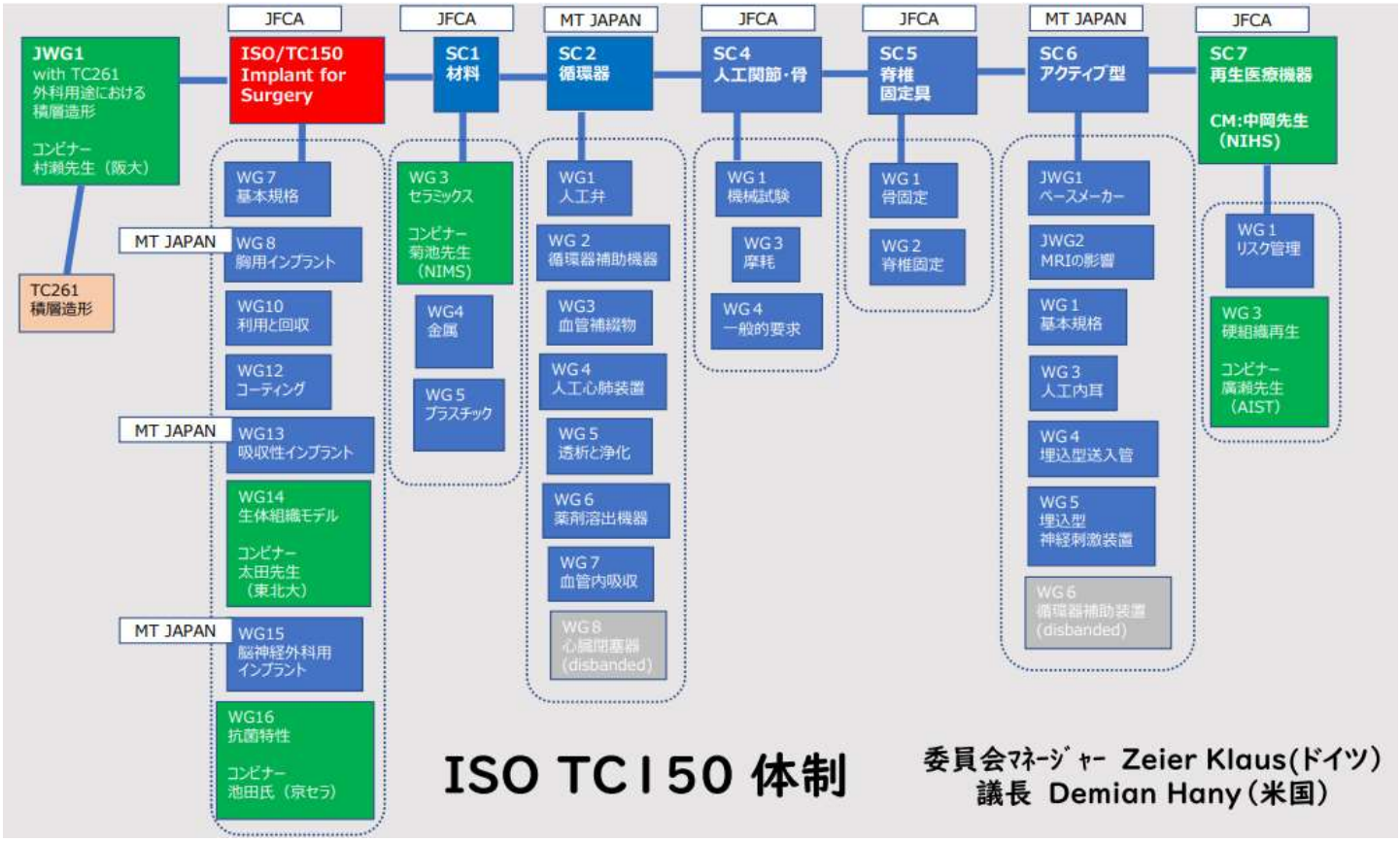
的は、患者の福祉と QOL の向上、医療従事者の製品品質に対する信頼、そして世界的な貿易と規制の円滑化である。このため、技術委員会（TC）の活動は、患者、産業界、外科医、医療センター、政府規制当局、試験施設、学術・研究コミュニティに利益をもたらすことが期待されている。開発された規格は、国連の持続可能な開発目標（SDG）、特に SDG3（Good health & well-being）を支援するものである。
ISO/TC 150 戦略事業計画の主な目的の一つに、主要な障害とそれを克服するための戦略がある。作業の効率と完成度を低下させる主な障害には、以下のようなものが考えられる。
1) 委員会の戦略的目標や目的に対する不十分な評価とコミュニケーション
2) 規格の重複
3) プロジェクトリーダー継続性の欠如
4) P メンバー間の不均一な参加及び投票
これらの障害を克服するための戦略は以下の通り。
1) 将来提案を含み、TC/SC 目標・目的に対する適切な評価と十分なコミュニケーションを実現する
2) 規格の重複を避け、または対処する
3) プロジェクトリーダーの継続性を改善する
4) P メンバー間のより積極的な参加と投票を推奨する

2024 年 2 月時点での TC150 活動状況



TC150 の構成
TC150 幹事国はドイツであり、委員会マネージャ（Committee Manager ; CM）はドイツ規格協会（DIN）所属の Zeier Klaus 氏が務める。ドイツ規格協会に関しては次の章にて概要を紹介する。
現在、TC150 WG8/WG13/WG15 及び TC150/SC2 と SC6 の国内審議団体を（一社）日本医療機器テクノロジー協会（MTJAPAN）が、それ以外の WG/SC の国内審議団体を（一社）日本ファインセラミックス協会（JFCA）が務める。また、SC7 は幹事国が日本であり、幹事国業務を JFCA が担っている。
幹事国事務局及び国内審議団体としての JFCA における主な活動は 3 つ。
① 委員会の開催　ISO/TC150/SC7 幹事国業務委員会・ISO/TC150 国内委員会
② 委員会での審議　他国提案への提言・日本提案開発戦略の立案
③ 総会への要職者派遣　委員会マネージャ・コンビ―ナ・プロジェクトリーダー

TC150 構成を図に示す。



DIN（ドイツ規格協会）とは

ドイツ規格協会 （Deutsches Institut für Normung e.V. ; DIN）は、 ドイツの国家標準化団体であり、ISO 加盟機関である。ベルリン に本部を置く。現在約 3 万の DIN 規格（DIN-Norm）を制定しており、ほぼ全ての技術分野をカバーしている。 1917 年に Normenausschuß der deutschen Industrie（NADI、ドイツ工業標準化委員会）として設立された。工業製品だけではなく多くの分野で標準化問題に取り組んでいることを反映して、1926 年に Deutscher Normenausschuß（DNA、ドイツ標準化委員会）に改称された。1975 年に Deutsches Institut für Normung(DIN)に改称され、国際および欧州レベルでドイツの利益を代表する公式の国家標準化団体としてドイツ政府から認められた。

ドイツ標準化協会(DIN)は、ドイツおよび世界中の標準化のための独立したプラットフォームとして、また産業、研究、社会全体のパートナーとして、デジタル経済や社会などの分野で多くの研究プロジェクトを実施。イノベーションの市場投入において重要な役割を果たしている。

業界、研究、消費者保護、公共部門から 36,000 人以上の専門家が、DIN が管理する標準化プロジェクトに専門知識を提供する。これらの努力の結果、世界貿易を促進し、合理化、品質保証、社会と環境の保護、およびセキュリティと通信の改善を促進する市場志向の標準と仕様が生まれた。

DIN は 1917 年に設立され、2017 年に 100 周年を迎えた。

DIN Standard

DIN 規格は、国内、欧州、および/または国際的なレベルでの作業の結果である。誰でも新しい規格の提案を提出することができ、採択された規格プロジェクトは、DIN 規格委員会、欧州規格機関 CEN（電気技術規格は CENELEC）の関連技術委員会、国際規格機関 ISO（電気技術プロジェクトは IEC）の関連委員会が、定められた手続き規則に従って実施することになる。

この作業には、メーカー、消費者、企業、研究機関、公的機関、試験機関など、すべての関係者が参加することが望まれる。DIN の作業部会は約 70 の規格委員会によって統括され、各委員会は特定の主題分野を担当。欧州レベルおよび国際レベルの作業については、DIN 規格委員会は CEN および ISO にそれぞれドイツの利害を代表する専門家を派遣している。DIN のスタッフは、標準化プロセスを調整し、プロジェクト管理全般を担当し、ドイツ規格コレクションの統一性と一貫性を確保している。

規格は完全なコンセンサスで開発される。つまり、専門家が技術状況を考慮し、共通の立場に到達することを目的として開発されていく。

DIN 規格は、少なくとも 5 年ごとに見直される。規格が現在の技術状況を反映しなくなった場合、改訂または撤回となる。

各 DIN 規格委員会は、その年に開発される規格プロジェクトを記述した作業計画に基づき、独自の予算を持っている。各規格プロジェクトのコストは、内部計算ツールを用いて、間接コストと直接コストを区別して決定される。直接費とは、人件費、旅費、非人件費（研究室間試験、技術文献など）など、規格の開発に直接起因するものである。間接的な管理コストには、欧州および国際レベルでのドイツの利益の代表、CEN および ISO の会員資格、標準化プロセスの管理で発生するコストが含まれる。これらの間接費と直接費を合わせると、規格の作成にかかる総費用となる。

DIN は、IT システム、人事管理、会計、法務部門などのサポート機能も有しており、これらはすべて間接管理費として製造コストに加算される。

これらの費用は外部プロジェクト資金と DIN の拠出金で賄われている。その目的は、少なくとも関係者がプロジェクト開発の直接費用を負担し、DIN が間接費用を賄うことにある。プロジェクトの資金は、民間資金（産業界から）、公的資金、DIN の拠出金によって賄われている。

DIN SPEC ～Today's idea. Tomorrow's standard～

優れたアイデアの成功は、それが市場に出るまでの期間によって左右されることが多い。DIN SPEC は、研究を市場性のある製品に変える最速の方法である。合意形成の義務がなく、より小規模で機動的な作業部会により、DIN SPEC をわずか数ヶ月で開発することが可能である。DIN の「ブランド」が世界中で尊重されているおかげで、DIN SPEC は効果的なマーケティング手段であり、顧客や潜在的なパートナーに広く受け入れられている。DIN の仕事は、DIN SPEC が既存の規格に抵触しないことを確認することである。Beuth Verlag（DIN の子会社で、国内外の規格、仕様書、技術規則、実践規範を提供）は、その国際的なコンタクトにより、DIN SPEC が発行され、幅広い顧客層に販売されることを確認している。そして、どの DIN SPEC も完全な規格の基礎と

して使用することができる。



DIN の運営資金　　標準作業の資金調達 - 公益のために

DIN は、非営利団体として登録された民間団体である。その資金源の 60%以上は、Beuth Verlag が提供する規格やその他の技術出版物、サービスの販売による。その他に、産業界からのプロジェクト資金、公的資金、会費などがある。

ドイツでは、標準化は産業界による自主規制の一形態として認識される。規格を購入することで、ユーザーは規格業務の民間資金を確保することができる。

≪DIN e.V. 2022 年度の収入構造≫

規格販売などの営業収入：59.7%

産業界からのプロジェクト資金（民間資金）18.1%

会費 10%

国からのプロジェクト資金（公的資金）12.1 %

【ISO/TC261 について】

ISO / TC 261 Additive Manufacturing（積層造形）は 2011 年に創設され、そのスコープを「アディティブ・マニュファクチャリング（AM）分野におけるプロセス、用語、定義、プロセスチェーン（ハードおよびソフト）、試験手順、品質パラメータ、供給契約、その他あらゆる基礎的事項に関する標準化」に置いている。



それ以前より ASTM が AM に関する用語、試験、Ti6Al4V 合金、AMF ファイル形式を中心にいくつかの業界標準を発表しており、その他にも多くの標準を開発中だった。そこで ISO と ASTM の PSDO 協定を結び、ASTM F 42 から共通規格の共同開発が開始された。また、各国のイニシアティブは ISO/TC 261 で検討されることになり、競合する複数の規格が開発される懸念は払拭されている。

●委員会が扱う主な分野と市場全体の規模

積層造形（AM）技術は、製品開発プロセスの本質的な部分である。プロトタイプ、ツール、生産部品の製造に使用される。部品を特定の形状に成型したり、巨大なブロックから切り出したりする従来の方法と比べ、AM は、液体、粉末、スタンド、フィルムを重ねて、金型を使わずに 3D 構造を構築するという原理に基づいている。

Wohler's Report 2022 によると、2021 年の市場規模は 152 億 4,000 万米ドル（一次 AM 市場で発生した収益）と推定されている。

●規格の利用可能性によってすでに実現した、あるいは期待される利益

標準化によるメリット：

-3D モデルデータから材料を接合するプロセス（AM）の体系的な開発、修正、使用により、革新的な製品を生み出す

-様々な添加物プロセスの評価においてユーザーを支援し、指定された製品需要に適切な技術を使用する

-標準化された試験手順に必要な、さまざまなプロセスの品質パラメータの仕様

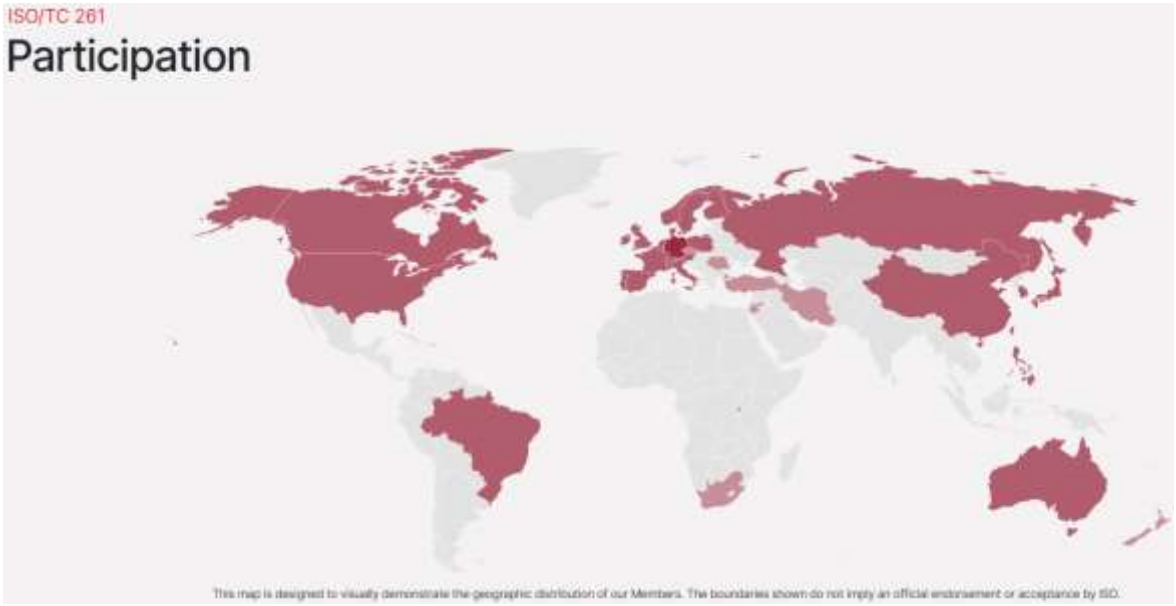
-適切な試験手順を規定することにより、品質パラメータの均一な解釈と評価を保証

-機能性と互換性を確保する AM 技術のプロセスチェーンの標準化

-AM モデルのデータ形式、データ構造、メトリクスの標準化

-製品を定義し、共通の言葉を見つけるために必要な語彙の標準化

●委員会の作業における主な目的と優先事項
ISO/TC 261 の主な目的は、積層造形のプロセス、そのプロセスチェーン（データ、材料、プロセス、ハードおよびソフトウェア、アプリケーション）、試験手順、品質パラメータ、供給契約、基礎、語彙を標準化することである。これらの目的は、常に市場のニーズに対応し、変化への柔軟な対応を可能にするものであることが、全メンバー団体によって合意されている。
2024 年 2 月時点で P メンバー27 か国、O メンバー9 か国の参加を得ている。



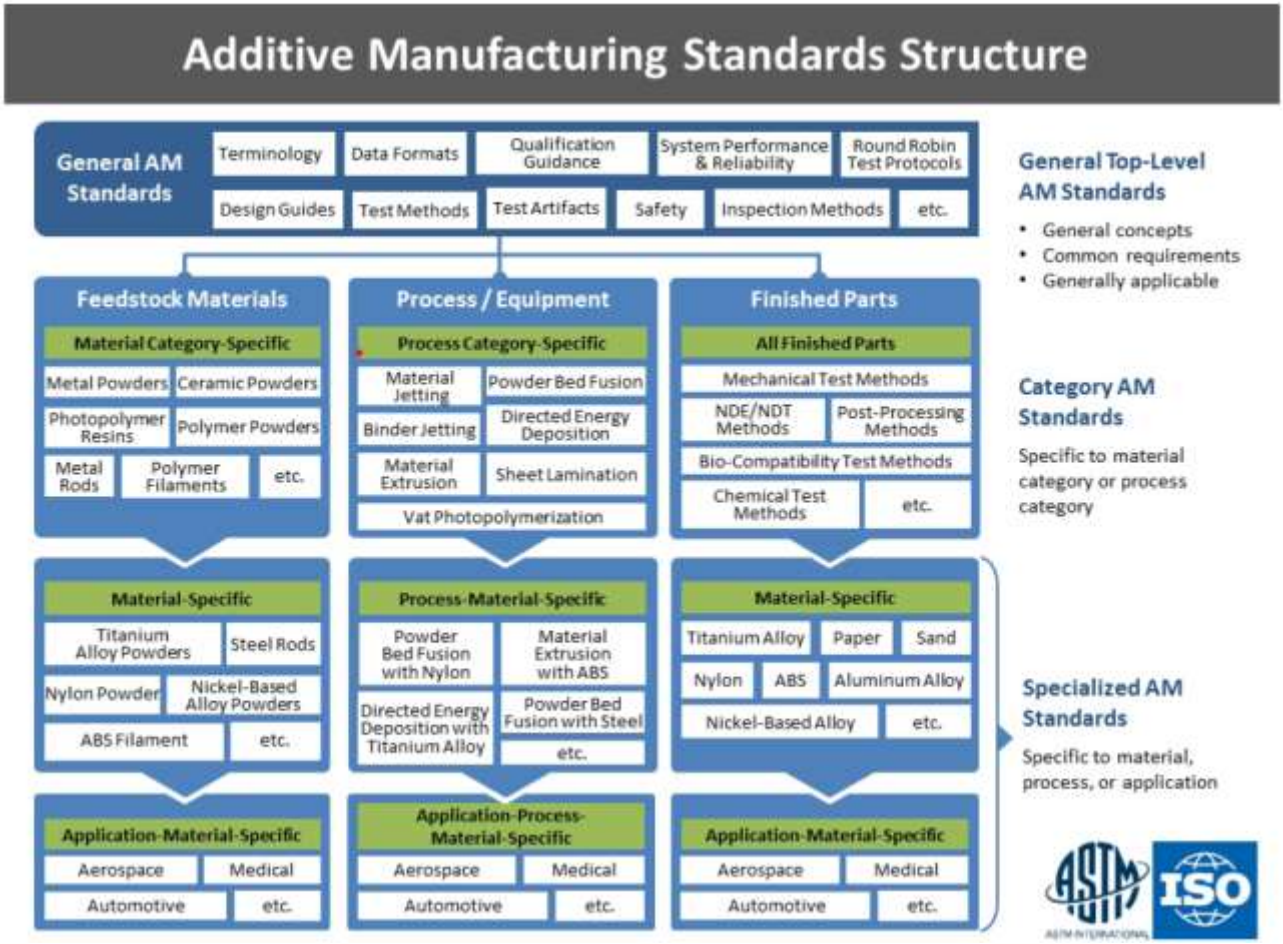
アディティブ・マニュファクチャリングは昨今本格的な製造方法として注目され、企業が製品を製造する方法に大きな影響を与えている。何万もの部品が製造され、数種類の航空機に搭載されている（出典：Wohlers Associates, Inc.）。例えばボーイング 787 には、すでに約 30 個のレーザー焼結部品が搭載されている（出典：スコット・マーティン、ボーイング、IAG 会員）。GE アビエーションは、新しい LEAP エンジン用の年間 30,000 個以上の燃料ノズルの製造に金属 AM の使用を開始した（出典：Wohler Report 2015）。また、250,000 個以上の寛骨臼カップが積層造形で製造され、その約半数がすでに患者に移植されている（出典：Lima Corporate 2022）。EOS（本社オーストラリア）によると、毎年 500 万個以上の金属製歯科用コーピング（クラウンやブリッジの製造に使用）が EOS の AM 装置で製造されている。
企業が積層造形プロセスや材料を認定・認証するにつれて、将来的にはさらに多くの種類の部品が生産されるようになるだろう。業界標準の開発は、生産に AM を採用するための前提条件である。

2024 年 2 月時点での TC261 活動状況



マーケティング動向として、AM は今後 10 年間で大きく成長すると見込まれている。その利点は、開発者が機能的な中空構造を小ロットで製造でき、応力要件の変化に合わせて構造を正確に修正できることにある。また、特定の気孔率や表面でコンポーネントをカスタマイズでき、超軽量コンポーネントも可能である。
アディティブ・マニュファクチャリングの短い歴史の中で、特定の利害関係者がその利点を認識し、常に新しい技術、プロセス、材料の開発を推し進めてきた。また将来的にも、これらの利害関係者が AM の成長をリードし、影響を与えるだろう。
●ユーザー
- 医療機器およびインプラントのサプライヤー
- 航空宇宙と自動車の OEM
- ハイテク機器の OEM
- 大学および研究開発機関
- AM 機器・材料サプライヤー
ISO/TC 261 の作業には、これらのグループからの専門家の参加が不可欠である。主委員会はすでに関連グループからの代表者で構成されているが、ここや各国のミラー委員会により多くの専門家を参加させるための継続的な努力が必要である。
また、資源とエネルギーの効率化と経済的な生産は、全産業において重要な課題である。AM 技術は、この課題に取り組むための革新的解決策のひとつになるだろう。
パーツを層ごとに生成することで、他の方法では不可能な幾何学的設計が可能になり、さらにデザイン主導の製造が可能になる。自動車や航空宇宙などの分野では多くの分野で資源が減少しているため、燃料消費削減を達成するための選択肢となる。
●ISO/TC 261 規格構造
①一般規格：一般的な概念、共通要件を規定する規格、またはほとんどの種類の AM 材料、プロセス、アプリケーションに一般的に適用される規格
②カテゴリー基準：材料カテゴリーまたはプロセスカテゴリーに固有の要件を規定する基準
③特殊規格：材料、プロセス、用途に特化した要件を規定する規格

下図は、AM 規格の共通構造を示している。



●委員会の構成

ISO/TC 261「積層造形」技術委員会の下に設置されたワーキンググループを示す。

ISO/TC 261/AHG　ISO/TC261 ホームページ用コンテンツ

ISO/TC 261/CAG　議長アドバイザリーグループ

ISO/TC 261/JAG　ISO/TC261 - ASTM F42 JG 活動に関する運営グループ

ISO/TC 261/WG 1　用語集

ISO/TC 261/WG 2　プロセス、システム及び材料

ISO/TC261/WG 3　試験方法及び品質仕様

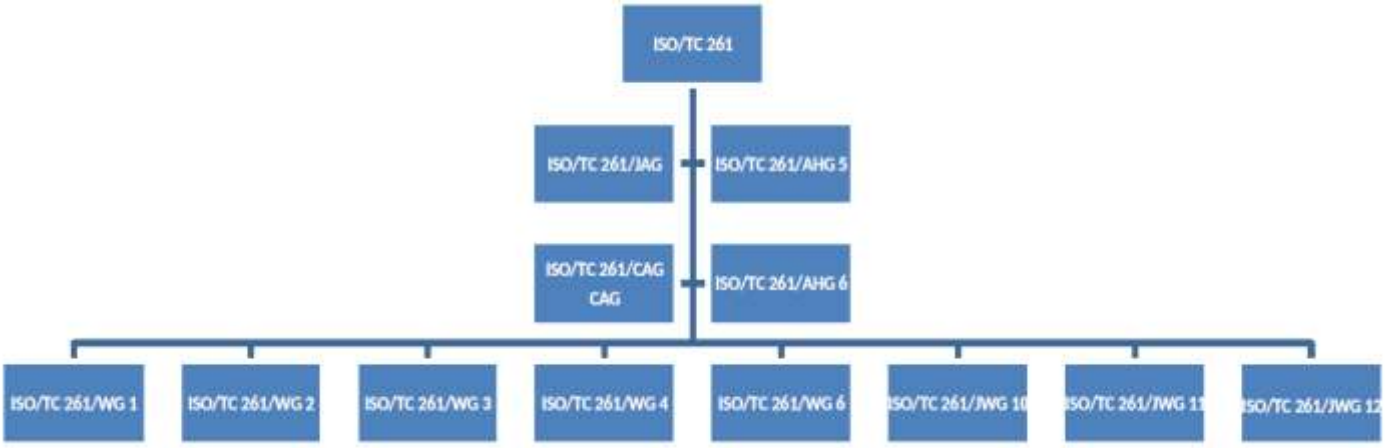
ISO/TC261/WG 4　データ及び設計

ISO/TC 261/WG 6　環境、安全衛生

ISO/TC 261/JWG 10（Joint ISO/TC 261 - ISO/TC 44/SC 14 WG）
航空宇宙アプリケーションにおける積層造形

ISO/TC 261/JWG 11 （Joint ISO/TC 261 - ISO/TC 61/SC 9 WG）
プラスチックの積層造形

ISO/TC 261/JWG 12 （Joint ISO/TC 261 - ISO/TC 130 WG）
色と透光性の測定


ISO/TC 261
ISO/TC 261/JAG
ISO/TC 261/AHG 5
ISO/TC 261/CAG
CAG
ISO/TC 261/AHG 6
ISO/TC 261/WG 1
ISO/TC 261/WG 2
ISO/TC 261/WG 3
ISO/TC 261/WG 4
ISO/TC 261/WG 6
ISO/TC 261/JWG 10
ISO/TC 261/JWG 11
ISO/TC 261/JWG 12

【ISO/TC106 について】

ISO/TC106 (Dentistry)は 1962 年創設で比較的古い TC である。
スコープを口腔医療における標準化に置き、健康改善への貢献を目標に掲げながら下記を標準化対象分野としている。
① 用語と定義
② 歯科用製品の性能、安全性、仕様要件
③ 臨床に関連する検査室試験法



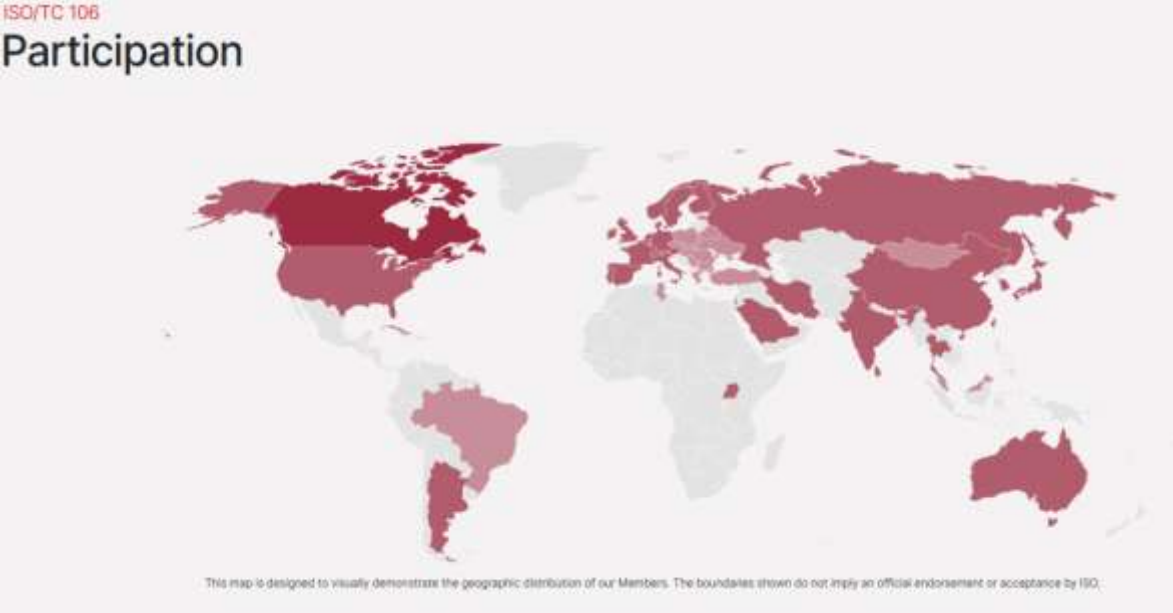
●事業環境
現代の歯科医療は、かつてないほど範囲が広く、複雑で科学的な基盤が整っている。今日の一般診療には、最小侵襲治療、接着審美修復、複雑な歯周病治療、可撤式および固定式矯正歯科、根管治療、小口腔外科、固定式または可撤式あるいはインプラント支持の補綴治療が含まれ、口腔疾患の予防は重要な役割を担っている。さらに、歯科診療器具は人間工学的な要求に従い、安全面や環境面に関する国内または国際的な規制にも準拠しなければならない。感染予防と管理に関する規制はかなり強化されており、これは歯科治療と規格開発に直接的な影響を及ぼしている。
一般的に歯科製品は、ほとんどの国で医療機器とみなされ、関連する国内または国際的な規制に準拠する必要がある。
一方歯科市場は、3D 画像、CAD/CAM ミリング、クラウンやブリッジなどの 3D プリンティングを提供するデジタル技術により、ますます高度化している。最近では、人工知能に基づく新技術が市場に参入し、この分野で関連規格が策定されつつある。
ほとんどの先進国で起こっている人口の高齢化も、歯科市場に影響を与える要因のひとつである。多くの人々は、高齢になるまで健康を維持するが、歯科リハビリテーションを含む身体的障害のために何らかの支援を必要とするようになり、歯科診療に変化をもたらすだろう。実例として、欠損した歯を補うための土台として顎にオッセオインテグレーテッド・インプラントを使用するケースの急増による新しい製品や技術の開発が挙げられる。
歯科インプラントは現在、多くの歯科医院に組み込まれており、年間埋入本数は劇的に増加し続けている。歯科用 CAD/CAM 技術も同様である。これらの技術には、デジタルイメージ採得、コンピュータデザイン、そして最終的な 3D 研削または 3D 研磨が含まれる。
以下のデータは、国際歯科製造業者（IDM）またはインターネットから入手可能な情報に基づいており、入手可能な最善の推定値である。
▪ COVID に先立ち、世界の歯科市場の規模は世界で 370 億米ドル、2021 年度の世界歯科市場は約 363 億米ドルになると予測されていた。2020 年の市場規模は 2019 年と比較して 7.6%減少したものの、2022～2029 年の年間平均成長率（CAGR）は 7.4%と予測されている。 2016 年時点で既に歯科インプラント市場は米国だけで約 130 億米ドル

と推定され、欧州が最大の市場であり、さらなる成長率が期待されている。その市場を牽引すると予想される主な要因は、良好な口腔衛生がもたらす利益に対する意識の高まりと、その結果として生じる、機能と審美を両立する歯の修復物に対する需要である。
▪ 世界のバイオセラミックス市場は、2017 年から 2025 年にかけて年平均成長率 7.0%で推移し、2025 年には 273 億米ドルに達すると予測されている。バイオセラミックスは、インプラントや修復物などの歯科用途に使用される。
▪ 世界の歯科消耗品市場は、2023 年に 555 億 8400 万米ドルに達すると予測されている。2022～2029 年の年間平均成長率（CAGR）は 7.4%と予測されている。歯科消耗品が市場の 80%を占め、残りの 20%は歯科機器である。歯科消耗品には、口腔衛生用品、インプラント、歯列矯正コンポーネント、口腔の健康回復・維持のための各種材料などが含まれる。
▪ 国際的な大手歯科企業は約 15 社あり、年間売上高は約 2 億米ドルから 20 億米ドルである。それ以外の業界は、全世界で 3,500 から 4,000 の中小企業で構成されている。最近では、CAD/CAM 分野から多くの企業が歯科市場に参入している。
▪ 世界保健機関（WHO）の推計によると、歯科医師や歯科関係者は全世界で 190 万人いるが、人口に対する歯科医師の比率には大きなばらつきがある。
▪ 歯科製品は医療機器として製造され、国によって異なる厳しい国内または国際的な法的規制の対象となり、医療機器を市場に出す前に満たさなければならない一連の必須要件が定義されている。ISO/TC 106 によって作成された規格は、これらの要求事項への適合を証明するためのツールとして認識されており、製品の品質向上と歯科患者、ユーザー、環境の健康と安全の保護に貢献している。

●規格の利用可能性によってすでに実現した、あるいは期待される利益
-市販されている経口製品の品質向上
-患者に提供される口腔ケアの質の向上
-成長する国際市場における貿易障壁の削減
-経口製品を製造・使用する国が増え、国際市場が成長
-臨床成績を予測するための、適用可能で信頼性の高い検査の提供
-歯科患者、利用者の健康と安全の保護
-歯科で使用される用語の統一
-法的要件に適合するためのツールの提供
-廃棄物管理など、国連の持続可能な開発目標に沿った持続可能性の向上
-温室効果ガス排出の抑制・削減に貢献し、歯科医療が気候変動に与える影響を軽減

●TC106 での標準開発
TC 106 は、31 の P メンバーと 16 の O メンバーで構成されている。歯科産業が盛んな国は全て参加しているといってよいだろう。P メンバー3 分の 2 が先進国、3 分の 1 が発展途上国および経済移行国である。業界の主要プレーヤーはおおむね参加しており、それなりにバランスが取れているが、欧州諸国が TC106 メンバーの 60%以上を占

めているため、議決事項では欧州の視点に偏る可能性がある。
近年、アジア諸国での活動が活発化し、ISO/TC106 年次総会が中国、香港、日本、韓国、タイで開催されている。



さらに、ISO/TC106 規格は米国で重要性を増している。南米からの参加は少ない。アフリカからの参加はほとんどない。その理由はおそらく主要な歯科産業がないことで説明できるだろう。
ISO/TC 106 は、欧州の CEN/TC 55 と緊密に協力して活動している。両委員会の作業プログラムは完全に調整されており、ISO/TC 106 で開発された規格はウィーン協定に基づき CEN/TC 55 で同時に採択されている。

2024 年 2 月時点での TC106 活動状況



ISO/TC 106 は、以下の他 ISO 委員会とリエゾンを持つ
- IEC/TC 62 －医療機器、ソフトウェア、システム
- ISO/TC 150 －外科用インプラント
- ISO/TC 150/SC 7 －組織工学医療製品
- ISO/TC 156 －金属および合金の腐食
- ISO/TC 159/SC 1 －人間工学の一般原則
- ISO/TC 159/SC 3 －人体計測とバイオメカニクス
- ISO/TC 170 － 外科用器具
- ISO/TC 194 －医療機器の生物学的および臨床的評価
- ISO/TC 210 －医療機器の品質管理および対応する一般的側面

▪ ISO/TC 215 －ヘルスインフォマティクス
▪ ISO/TC 217 －化粧品
▪ ISO/TC 304 －医療組織管理
ISO/TC106 はまた、以下の団体とも連携している
▪ 欧州委員会（EC）
▪ FDI 世界歯科連盟（FDI）
▪ 欧州歯科連盟（FIDE）
▪ 国際歯科研究協会（IADR）
▪ インターナショナル・デンタル・マニュファクチャラーズ（IDM）
▪ 世界税関機構（WCO）
▪ 世界保健機関（WHO）
さらに、ISO/TC106 は世界歯科連盟（FDI）と正式に協定を結び、FDI は歯科診療における ISO 規格の使用を承認している。
ISO/TC106 は、かつては年 1 回、直接会って国際規格会議を開催していたが、COVID によって突然バーチャルな環境に適応して業務を遂行しなければならなくなった。これは課題と機会の両方をもたらした。コミュニケーション手段としてオンライン会議の使用が必須となったことで、新しい技術の習得、個人のインターネットサービスの安定、様々なタイムゾーンからの積極的な参加が可能になり、発展途上国など、渡航の制限や費用の問題からこれまで標準会議に参加する機会がなかった人々にとっては、特に大きなチャンスとなった。2023 年以降は対面形式に戻っており 2023 年総会は、9 月にオーストラリアシドニーで開催された。

●委員会の構成
ISO/TC 106 歯科
ISO/TC 106/SC 1 充填および修復材料
ISO/TC 106/SC 2 補綴材料
ISO/TC 106/SC 3 用語解説
ISO/TC 106/SC 4 歯科器具
ISO/TC 106/SC 6 歯科医療機器
ISO/TC 106/SC 7 オーラルケア製品
ISO/TC 106/SC 8 歯科インプラント
ISO/TC 106/SC 9 歯科用 CAD/CAM システム
ISO TC 106 の傘下には、包括的なトピックを扱う 3 つの作業部会が設置されている：
- WG 10 - 生物学的評価
- WG 12 - 歯科インプラント手術ガイド
- WG 13 - 歯科 - 人工知能（AI）に基づく 2 次元 X 線分析 - データ生成、データ注釈、データ処理

第 4 章　積層造形市場動向に関する国内外調査

（国内調査～グローバルセラミックス積層造形材料市場～）

A：調査目的

国際標準化を目指すにあたり、その重要性は改めて言うまでもないが、国際標準化活動の成果は、互換性の確保・製品の適切な品質設定・貿易の円滑化など企業活動の支援に留まらず、生産効率の向上・競争環境の整備など企業競争力に関与し、さらには自社もしくは自国の開発技術をいち早く国際標準としグローバル市場で差別化の礎とするなど、差別化に深く関与し、日本企業の国際競争力を左右する重要な要素となっている。従って、国際標準化戦略立案にあたっては、現在及び将来予想される産業動向の理解が欠かせない。

本調査は、グローバルセラミックス積層造形材料市場について、市場規模の推移と将来予測、参入企業各社の動向の調査を通し、本分野の産業動向実態を把握し、国際標準化戦略立案のための基礎資料を得ることを目的として実施した。

B：調査内容

●概要

グローバルセラミックス積層造形材料の市場規模は 2022 年において、57.11 百万米ドルであったが、2023 年から 2029 年まで、26.71%の年平均成長率（以下、CAGR という）で成長し、2029 年には 274.31 百万米ドルに達すると予測される。

北米のセラミックス積層造形材料市場規模は、2022 年に 19.32 百万米ドルであったが、2023 年から 2029 年まで、26.52%の CAGR で成長し、2029 年には 80.55 百万米ドルに達すると予測される。

アジア太平洋のセラミックス積層造形材料市場規模は、2022 年に 13.26 百万米ドルであったが、2023 年から 2029 年まで、31.94%の CAGR で成長し、2029 年には 89.4 百万米ドルに達すると予測される。

欧州のセラミックス積層造形材料市場規模は、2022 年に 23.44 百万米ドルであったが、2023 年から 2029 年まで、23.30%の CAGR で成長し、2029 年には 99.77 百万米ドルに達すると予測される。

●調査対象の範囲

この調査レポートでは、グローバルセラミックス積層造形材料市場を、定量的および定性的な分析を交えて包括的に紹介する。読者がビジネス/成長戦略を策定し、競争環境を評価し、現在の市場におけるセラミックス積層造形材料に関するビジネス上の意思決定を行うための手助けとなることを目的とする。

セラミックス積層造形材料市場の規模、推計、予測は、2022 年を基準年として、2018 年から 2029 年までの販売量および売上の実績と予測データを提供する。このレポートでは、グローバルセラミックス積層造形材料市場を、製品の種類、用途、会社、地域別に包括的に区分し、各市場の規模を掲載する。また、COVID-19 およびロシア・ウク

ライナ戦争の影響についても、市場規模の推定に考慮している。
このレポートでは、市場をより深く理解するために、競争環境、主要な競合企業の概要、および各社の市場シェアを掲載する。また、技術動向や新製品開発についても解説する。

●市場分類
このレポートではセラミックス積層造形材料市場を会社別、製品別、用途別、地域・国別の 5 つのセグメントで包括的に調査し、2022 年を基準として、過去と今後（2018 年-2022 年、2023 年-2029 年）の市場規模（売上、販売量、平均価格）および CAGR を示す。また、各セグメントにおける市場動向を提供する。

●レポート構成
第 1 節：**製品別市場**の概要を紹介する。北米、欧州、アジア太平洋、南米、中東・アフリカの製品別市場規模を紹介する。
第 2 節：競争環境、価格、販売量、売上、市場シェア、ティア（ランキング）などを**会社別に分析**する。
第 3 節：**地域別市場**の概要を紹介する。各地域の市場規模や発展の可能性を定量的に分析し、今後の発展見通しやグローバル市場空間を紹介する。
第 4 節：**用途別市場**の概要を紹介する。北米、欧州、アジア太平洋、南米、中東・アフリカの用途別市場規模を紹介する。
第 5 節、第 6 節、第 7 節、第 8 節、第 9 節。北米、欧州、アジア太平洋、南米、中東・アフリカの**国別の市場規模**を分析する。
第 10 節： 市場動向、製造コスト、産業チェーン、市場の推進力と制限要因、業界が直面する課題とリスクなどを分析する。
第 11 節：セラミックス積層造形材料の ASTM および ISO 規格を紹介する。
第 12 節： 調査結果および結論。

第 1 節：セラミックス積層造形材料の市場概要

1.1 セラミックス積層造形材料の製品概要
セラミック積層造形（C-AM）は、3D-CAD や 3DCG ソフトの 3 次元データをもとに材料の層を積み重ね、3 次元の造形物を作成する技術である。このプロセスは、3D モデルをスライスし、金型や機械加工なしでセラミック材料を層ごとに積層することで構造体を作り出す。
本レポートは、積層造形に使用されるセラミック材料について研究している。

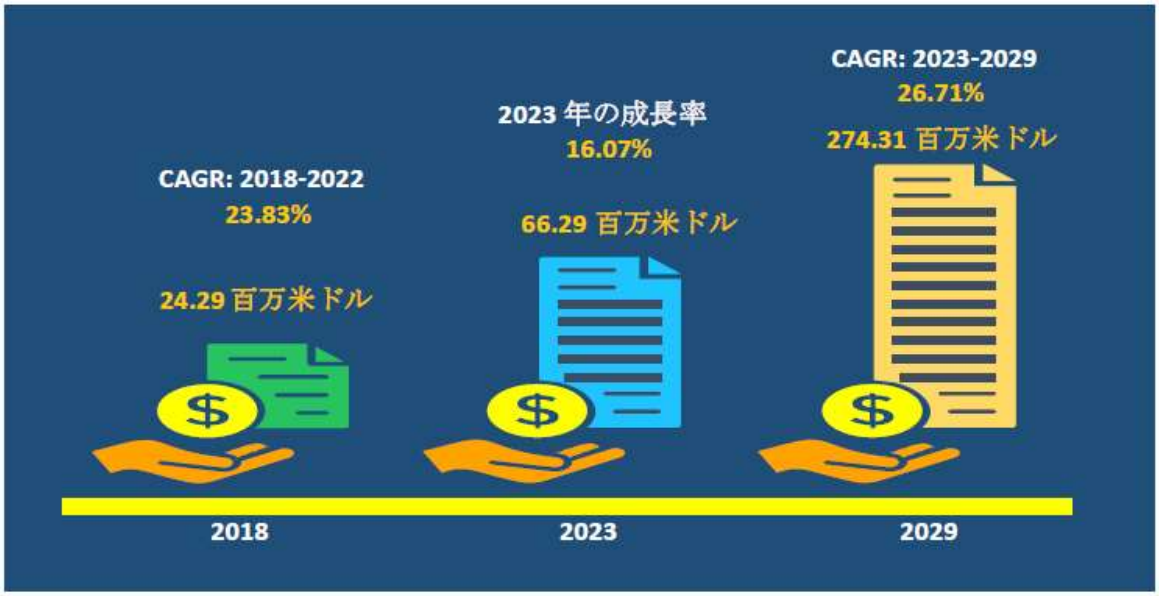
図 1.　セラミックス積層造形材料の製品写真



出典：二次資料、QYResearch, 2023 年

グローバルセラミックス積層造形材料の市場規模は 2022 年において、57.11 百万米ドルであったが、2023 年から 2029 年まで、26.71%の年平均成長率（以下、CAGR という）で成長し、2029 年には 274.31 百万米ドルに達すると予測される。
2023 年のデータは、過去のデータと、産業の専門家、製造業者、販売業者、エンドユーザーなどの統合的見解に基づいた推定値である。
トップダウン/ボトムアップの調査方法により、グローバルセラミックス積層造形材料の市場規模を検証し、会社別、地域別、製品別、および用途別（エンドユーザー）の市場規模を推定することができる。このレポートに掲載されている全体マーケットおよびサブマーケットの市場推定と市場予測を実施するため、複数の検証方法とともに、トップダウンとボトムアップの両調査方法が、広く利用されている。具体的に、調査目的、調査対象・規模の明確化、調査方法の決定などの調査プロセスを経て、トップダウン/ボトムアップの方法を用い、かつ複数の検証方法でデータを検証する。調査で得られたすべてのデータは、定性的および定量的分析が行われ、レポートの重要な情報として使用される。

図 2.　グローバルセラミックス積層造形材料の市場規模（2018 vs 2023 vs 2029、百万米ドル）



出典：二次資料、専門家インタビュー、QYResearch, 2023 年

図 3.　グローバルセラミックス積層造形材料の売上とその成長率（2018-2029、百万米ドル）



出典：二次資料、専門家インタビュー、QYResearch, 2023 年

図 4.　グローバルセラミックス積層造形材料の販売量とその成長率（2018-2029、トン）



出典：専門家インタビュー、二次資料、QYResearch，2023 年

1.2 製品別セラミックス積層造形材料の市場概要

セラミックス積層造形材料は主に粉末、樹脂、その他に分けられる。

1.2.1 粉末

材料は粉末状である。

図 5.　粉末の製品写真



出典：二次資料、QYResearch，2023 年

表 1.　粉末の主要企業

	会社名	製造拠点／工場の所在地
1	AGC セラミックス	日本
2	大平洋ランダム	日本
3	Kwambio	ウクライナ
4	Lithoz	オーストリア
5	Tethon 3D	米国

出典：上記会社、二次資料、専門家インタビュー、QYResearch, 2023 年

図 6.　粉末　グローバルセラミックス積層造形材料の販売量と成長率（2018-2029、トン）



出典：二次資料、専門家インタビュー、QYResearch, 2023 年

1.2.2 樹脂

材料は粉末状である。

図 7.　樹脂の製品写真



出典：二次資料、QYResearch, 2023 年

表 2.　樹脂の主要企業

	会社名	製造拠点／工場の所在地
1	ExOne	米国
2	Tethon 3D	米国
3	Admatec	オランダ

出典：上記会社、二次資料、専門家インタビュー、QYResearch, 2023 年

図 8.　樹脂　グローバルセラミックス積層造形材料の販売量と成長率（2018-2029、トン）



出典：二次資料、専門家インタビュー、QYResearch, 2023 年

1.2.3 その他

材料はフィラメント形状である

図 9.　その他の製品写真



出典：二次資料、QYResearch, 2023 年

表 3.　その他の主要企業

	会社名	製造拠点／工場の所在地
1	長峰製作所	日本

出典：上記会社、二次資料、専門家インタビュー、QYResearch, 2023 年

図 10.　その他　グローバルセラミックス積層造形材料の販売量と成長率（2018-2029、トン）



出典：二次資料、専門家インタビュー、QYResearch, 2023 年

1.3 製品別グローバルセラミックス積層造形材料の市場規模

以下の表は、製品別に、2018 年から 2029 年までのセラミックス積層造形材料の市場規模（販売量・売上）、市場シェアと成長トレンドを示している。

CAGR（2023-2029)は、製品別の販売量と市場全体の販売量に基づいて算出される。

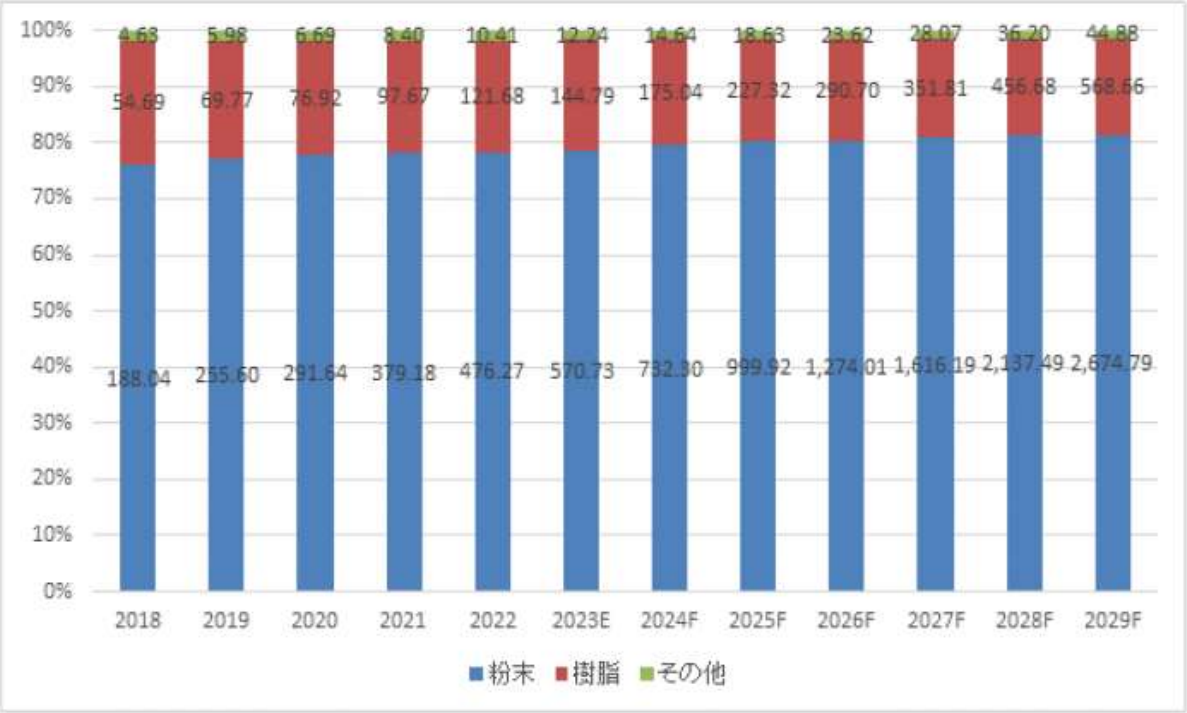
1.3.1 製品別グローバルセラミックス積層造形材料の販売量（2018-2029）

表 4.　製品別グローバルセラミックス積層造形材料の販売量と CAGR（2018 vs 2022 vs 2029、トン）

製品別	2018	2022	2029	CAGR（2018-2022）	CAGR（2023-2029）
粉末	188.04	476.27	2,674.79	26.15%	29.36%
樹脂	54.69	121.68	568.66	22.13%	25.61%
その他	4.63	10.41	44.88	22.45%	24.18%
合計	247.36	608.36	3288.33	25.23%	28.58%

出典：専門家インタビュー、二次資料、QYResearch, 2023 年

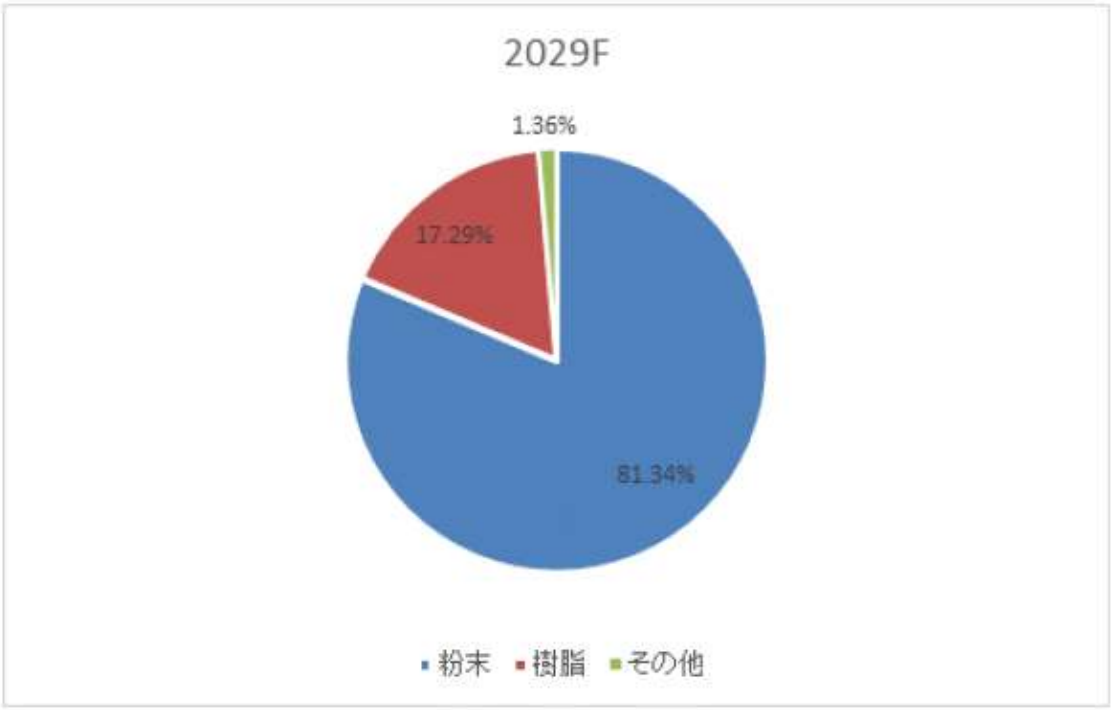
図 11.　製品別グローバルセラミックス積層造形材料の販売量（2018-2029、トン）



出典：二次資料、専門家インタビュー、QYResearch, 2023 年

図 12.　製品別グローバルセラミックス積層造形材料の販売量市場シェア（2022 vs 2029）





出典：二次資料、専門家インタビュー、QYResearch，2023 年

1.3.2 製品別グローバルセラミックス積層造形材料の市場規模（2018-2023）

表 5.　製品別グローバルセラミックス積層造形材料の販売量（2018-2023、トン）

製品別	2018	2019	2020	2021	2022	2023
粉末	188.04	255.60	291.64	379.18	476.27	570.73
樹脂	54.69	69.77	76.92	97.67	121.68	144.79
その他	4.63	5.98	6.69	8.40	10.41	12.24
合計	247.36	331.35	375.25	485.25	608.36	727.76

出典：専門家インタビュー、二次資料、QYResearch，2023 年

表 6.　製品別グローバルセラミックス積層造形材料の販売量市場シェア（2018-2023）

製品別	2018	2019	2020	2021	2022	2023
粉末	76.02%	77.14%	77.72%	78.14%	78.29%	78.42%
樹脂	22.11%	21.06%	20.50%	20.13%	20.00%	19.90%
その他	1.87%	1.80%	1.78%	1.73%	1.71%	1.68%
合計	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%

出典：専門家インタビュー、二次資料、QYResearch，2023 年

1.3.3 製品別グローバルセラミックス積層造形材料の市場規模予測（2024-2029）

表 7.　製品別グローバルセラミックス積層造形材料の販売量（2024-2029、トン）

製品別	2024	2025	2026	2027	2028	2029
粉末	732.30	999.92	1,274.01	1,616.19	2,137.49	2,674.79
樹脂	175.04	227.32	290.70	351.81	456.68	568.66
その他	14.64	18.63	23.62	28.07	36.20	44.88
合計	921.98	1,245.87	1,588.33	1,996.07	2630.37	3288.33

出典：専門家インタビュー、二次資料、QYResearch，2023 年

表 8.　製品別グローバルセラミックス積層造形材料の販売量市場シェア（2024-2029）

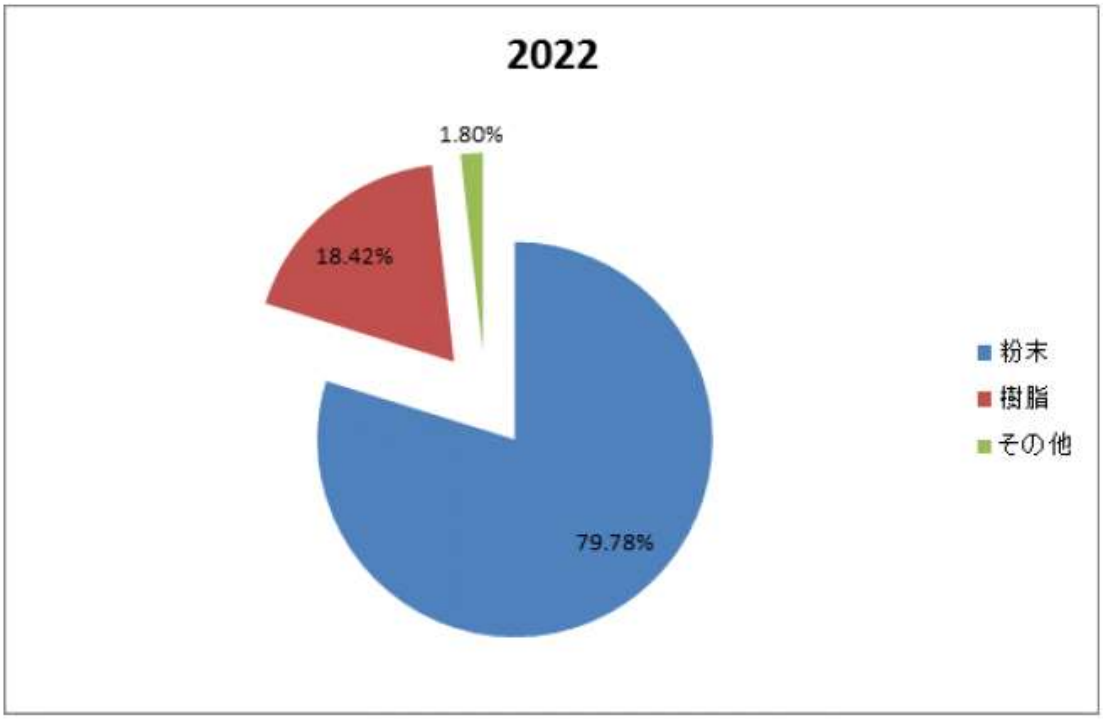
製品別	2024	2025	2026	2027	2028	2029
粉末	79.43%	80.26%	80.21%	80.97%	81.26%	81.34%
樹脂	18.99%	18.25%	18.30%	17.63%	17.36%	17.29%
その他	1.59%	1.50%	1.49%	1.41%	1.38%	1.36%
合計	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%

出典：専門家インタビュー、二次資料、QYResearch，2023 年

1.4 主要地域における製品別市場規模

1.4.1 北米 製品別セラミックス積層造形材料の市場規模（2018-2023）

図 13.　北米 製品別セラミックス積層造形材料の販売量市場シェア（2022）



出典：専門家インタビュー、二次資料、QYResearch，2023 年

表 9.　北米 製品別セラミックス積層造形材料の販売量（2018-2023、トン）

北米	2018	2019	2020	2021	2022	2023
粉末	67.33	88.82	103.11	131.64	165.32	169.01
樹脂	18.58	21.91	23.59	29.84	38.18	45.85
その他	1.66	2.05	2.32	2.96	3.73	4.44
合計	87.57	112.78	129.02	164.44	207.23	219.30

出典：専門家インタビュー、二次資料、QYResearch, 2023 年

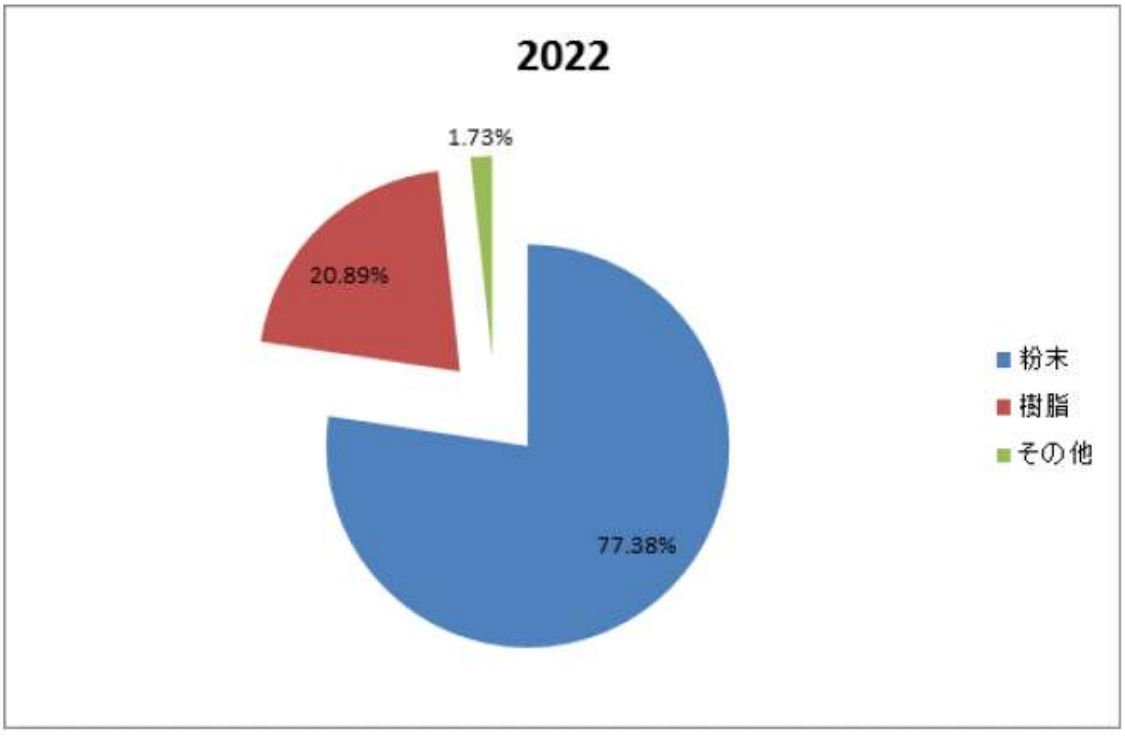
1.4.2 欧州 製品別セラミックス積層造形材料の市場規模（2018-2023）

表 10.　欧州 製品別セラミックス積層造形材料の販売量（2018-2023、トン）

欧州	2018	2019	2020	2021	2022	2023
粉末	79.00	101.93	115.97	150.48	185.94	234.57
樹脂	22.83	29.04	32.32	41.13	50.21	59.24
その他	1.96	2.49	2.76	3.41	4.16	4.83
合計	103.79	133.46	151.05	195.02	240.31	298.64

出典：専門家インタビュー、二次資料、QYResearch, 2023 年

図 14.　欧州 製品別セラミックス積層造形材料の販売量市場シェア（2022）



出典：専門家インタビュー、二次資料、QYResearch, 2023 年

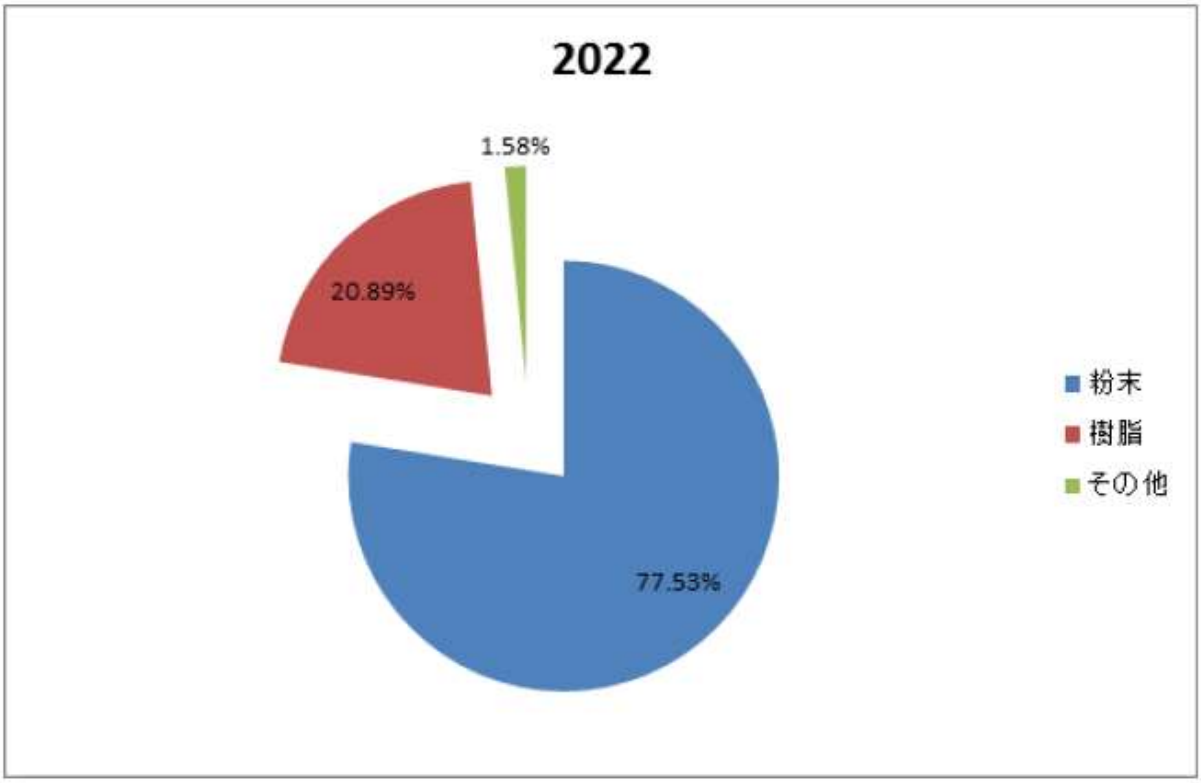
1.4.3 アジア太平洋 製品別セラミックス積層造形材料の市場規模（2018-2023）

表 11.　アジア太平洋 製品別セラミックス積層造形材料の販売量（2018-2023、トン）

アジア太平洋	2018	2019	2020	2021	2022	2023
粉末	41.71	58.41	65.44	88.02	113.96	153.60
樹脂	13.28	17.07	19.16	24.52	30.71	36.65
その他	1.01	1.31	1.47	1.86	2.32	2.74
合計	56.00	76.79	86.07	114.40	146.99	192.99

出典：専門家インタビュー、二次資料、QYResearch，2023 年

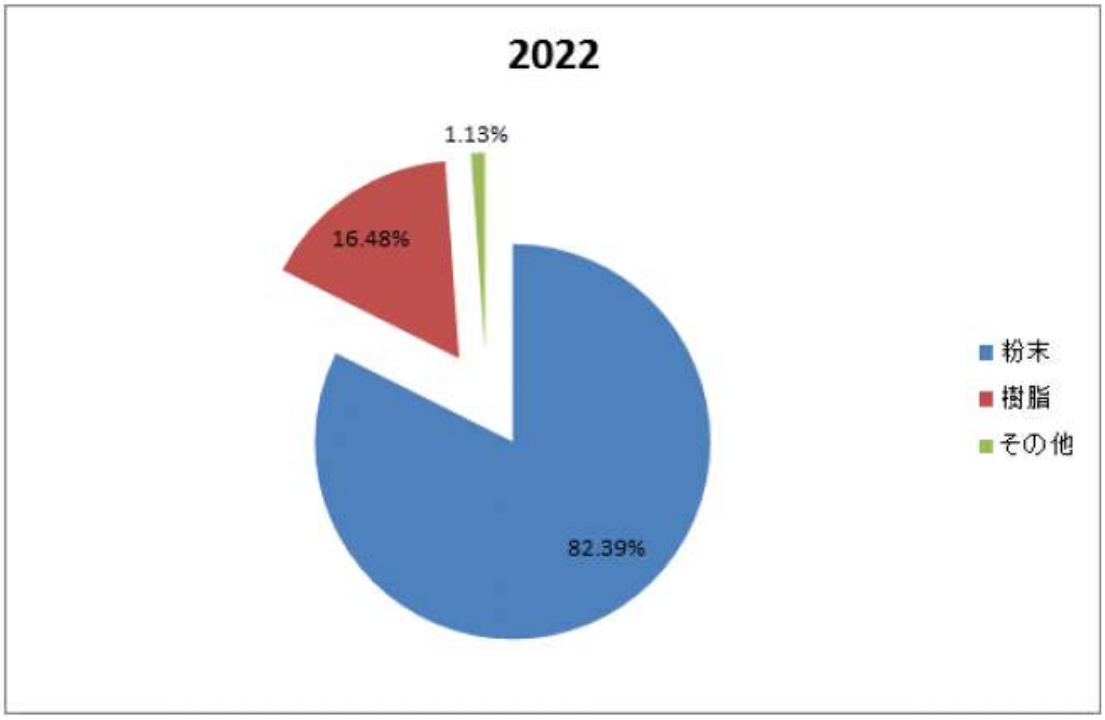
図 15.　アジア太平洋 製品別セラミックス積層造形材料の販売量市場シェア（2022）



出典：専門家インタビュー、二次資料、QYResearch，2023 年

1.4.4 南米 製品別セラミックス積層造形材料の市場規模（2018-2023）

図 16.　南米 製品別セラミックス積層造形材料の販売量市場シェア（2022）



出典：専門家インタビュー、二次資料、QYResearch, 2023 年

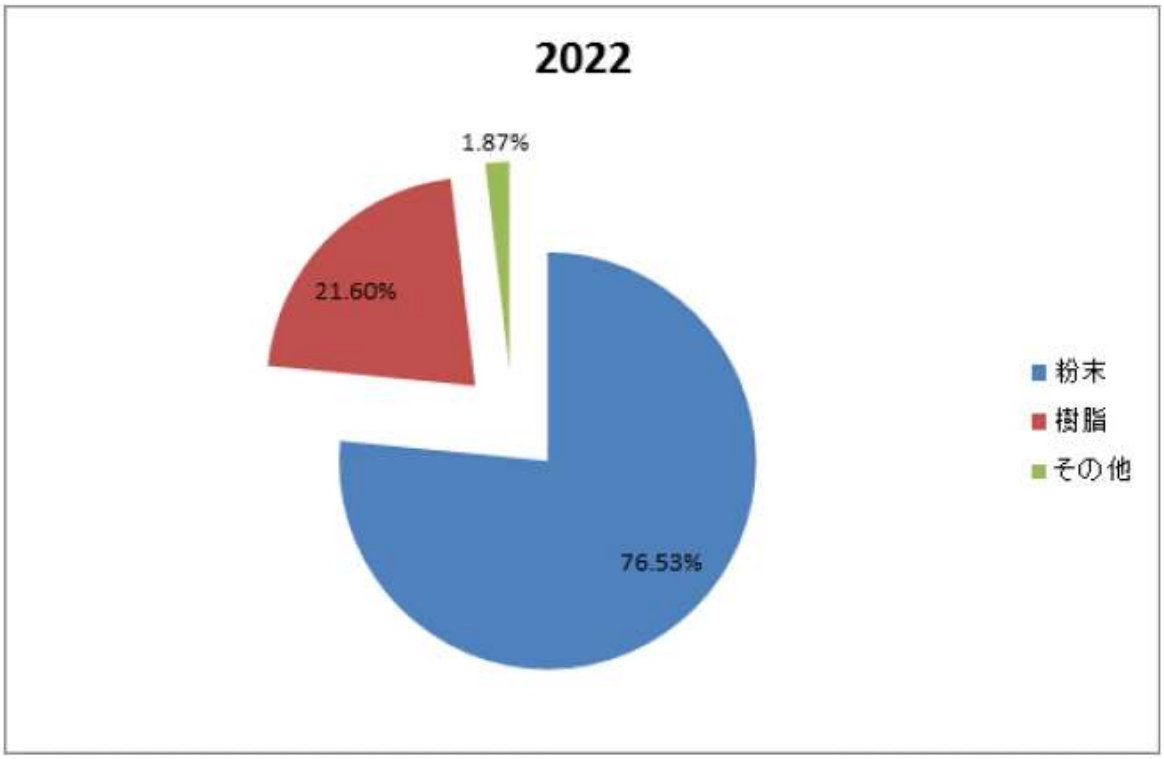
表 12.　南米 製品別セラミックス積層造形材料の販売量（2018-2023、トン）

南米	2018	2019	2020	2021	2022	2023
粉末	0.00	3.87	4.26	5.37	6.55	8.00
樹脂	0.00	0.93	0.98	1.14	1.31	1.56
その他	0.00	0.07	0.07	0.08	0.09	0.10
合計	0.00	4.87	5.31	6.59	7.95	9.66

出典：専門家インタビュー、二次資料、QYResearch, 2023 年

1.4.5 中東・アフリカ 製品別セラミックス積層造形材料の市場規模（2018-2023）

図 17.　中東・アフリカ 製品別セラミックス積層造形材料の販売量市場シェア（2022）



出典：専門家インタビュー、二次資料、QYResearch, 2023 年

表 13.　中東・アフリカ 製品別セラミックス積層造形材料の販売量（2018-2023、トン）

中東・アフリカ	2018	2019	2020	2021	2022	2023
粉末	0.00	2.57	2.86	3.67	4.50	5.55
樹脂	0.00	0.82	0.87	1.04	1.27	1.49
その他	0.00	0.06	0.07	0.09	0.11	0.13
合計	0.00	3.45	3.80	4.80	5.88	7.17

出典：専門家インタビュー、二次資料、QYResearch, 2023 年

第 2 節：会社別グローバルセラミックス積層造形材料の市場競争

グローバルセラミックス積層造形材料の主要会社には、3D Cream や ExOne などがある。これらの会社は、優れた戦略の策定、多様な製品・用途の提供、グローバルなプレゼンスの拡大によって、市場シェアの拡大に取り組んでいる。

市場には大小多数の会社が存在するため、このレポートでは、市場内の全会社の市場シェアを記載することではなく、市場の主要会社を分析する。

2.1 グローバル主要会社のセラミックス積層造形材料の販売量(2018 2023)

以下の表は、2018 年から 2023 年までの主要会社のセラミックス積層造形材料の販売量と市場シェアを示している。2023 年のデータは、過去の数値と今年取材したデータに基づいた推定値である。

二次調査により、市場の主要会社を特定し、一次調査と二次調査により、その市場規模を決定する。二次調査では、主要会社のアニュアルレポートおよび財務報告書を調査する。一次調査では、経験豊富な第一線のスタッフ、取締役、CEO、マーケティング担当役員など、主要なオピニオンリーダーや業界専門家への広範なインタビューを実施する。製品市場の構成比、市場シェア、成長率、および内訳は、二次資料を用いて決定し、一次資料で検証する。

表 14.　会社別グローバルセラミックス積層造形材料の販売量（2018-2023、トン）

会社名	2018	2019	2020	2021	2022	2023
3D Cream	69.49	95.62	111.71	154.78	181.82	218.62
ExOne	39.34	48.53	55.91	79.82	90.88	112.99
AGC セラミックス	56.16	68.63	72.34	78.39	92.70	97.36
Formlabs	13.99	18.77	21.38	24.61	29.33	38.02
Lithoz	19.06	27.98	31.64	35.78	41.21	50.86
Prodways	10.53	13.96	16.19	19.25	25.03	27.96
大平洋ランダム	10.21	13.22	16.65	17.75	20.57	22.75
Tethon 3D	4.74	6.58	7.58	9.33	14.07	17.55
長峰製作所.	4.05	5.47	5.74	7.60	8.61	11.19
Kwambio	1.22	1.54	1.68	3.24	4.52	6.78
Admatec	0.86	1.24	1.87	3.15	3.37	4.45
その他	17.71	29.81	32.56	51.55	96.25	119.23
合計	247.36	331.35	375.25	485.25	608.36	727.76

出典：上記会社、二次資料、専門家インタビュー、QYResearch, 2023 年

表 15.　会社別グローバルセラミックス積層造形材料の販売量市場シェア（2018-2023）

会社名	2018	2019	2020	2021	2022	2023
3D Cream	28.09%	28.86%	29.77%	31.90%	29.89%	30.04%
ExOne	15.90%	14.65%	14.90%	16.45%	14.94%	15.53%
AGC セラミックス	22.70%	20.71%	19.28%	16.15%	15.24%	13.38%
Formlabs	5.66%	5.66%	5.70%	5.07%	4.82%	5.22%
Lithoz	7.71%	8.44%	8.43%	7.37%	6.77%	6.99%
Prodways	4.26%	4.21%	4.31%	3.97%	4.11%	3.84%
大平洋ランダム	4.13%	3.99%	4.44%	3.66%	3.38%	3.13%
Tethon 3D	1.92%	1.99%	2.02%	1.92%	2.31%	2.41%
長峰製作所.	1.64%	1.65%	1.53%	1.57%	1.42%	1.54%
Kwambio	0.49%	0.46%	0.45%	0.67%	0.74%	0.93%
Admatec	0.35%	0.37%	0.50%	0.65%	0.55%	0.61%
その他	7.16%	9.00%	8.68%	10.62%	15.82%	16.38%
合計	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%

出典：上記会社、二次資料、専門家インタビュー、QYResearch, 2023 年

2.2 グローバル主要会社のセラミックス積層造形材料の売上(2018-2023)

このレポートの市場予測は、セラミックス積層造形材料の工場出荷価格（メーカー、販売代理店、卸売業者、貿易業者による割引を除く）に基づいている。

以下の表は、2018 年から 2023 年までの主要会社のセラミックス積層造形材料の売上と市場シェアを示している。 2023 年のデータは、過去の数値と今年取材したデータに基づいた推定値である。

表 16.　会社別グローバルセラミックス積層造形材料の売上（2018-2023、百万米ドル）

会社名	2018	2019	2020	2021	2022	2023
3D Cream	6.05	8.39	9.74	13.23	15.48	17.83
ExOne	4.81	5.87	6.75	9.64	10.87	13.43
AGC セラミックス	4.96	6.10	6.42	6.81	8.05	8.16
Formlabs	1.89	2.53	2.89	3.19	3.78	4.84
Lithoz	1.70	2.49	2.82	3.09	3.71	4.45
Prodways	1.37	1.80	2.10	2.40	3.11	3.41
大平洋ランダム	0.93	1.19	1.51	1.61	1.80	1.91
Tethon 3D	0.46	0.64	0.74	0.90	1.35	1.61
長峰製作所	0.50	0.67	0.70	0.92	1.02	1.28
Kwambio	0.11	0.14	0.15	0.28	0.39	0.57
Admatec	0.08	0.11	0.17	0.27	0.28	0.36
その他	1.43	2.42	2.58	3.94	7.27	8.44
合計	24.29	32.35	36.57	46.28	57.11	66.29

出典：上記会社、二次資料、専門家インタビュー、QYResearch, 2023 年

表 17.　会社別グローバルセラミックス積層造形材料の売上市場シェア（2018-2023）

会社名	2018	2019	2020	2021	2022	2023
3D Cream	24.91%	25.94%	26.63%	28.59%	27.11%	26.90%
ExOne	19.80%	18.15%	18.46%	20.83%	19.03%	20.26%
AGC セラミックス	20.42%	18.86%	17.56%	14.71%	14.10%	12.31%
Formlabs	7.78%	7.82%	7.90%	6.89%	6.62%	7.30%
Lithoz	7.00%	7.70%	7.71%	6.68%	6.50%	6.71%
Prodways	5.64%	5.56%	5.74%	5.19%	5.45%	5.14%
大平洋ランダム	3.83%	3.68%	4.13%	3.48%	3.15%	2.88%
Tethon 3D	1.89%	1.98%	2.02%	1.94%	2.36%	2.43%
長峰製作所	2.06%	2.07%	1.91%	1.99%	1.79%	1.93%
Kwambio	0.45%	0.43%	0.41%	0.61%	0.68%	0.86%
Admatec	0.33%	0.34%	0.46%	0.58%	0.49%	0.54%
その他	5.89%	7.48%	7.05%	8.51%	12.73%	12.73%
合計	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%

2.3 グローバル主要会社のセラミックス積層造形材料の価格(2018-2023)

以下の表は、セラミックス積層造形材料の売上と販売量に基づいて、各社のセラミックス積層造形材料の平均販売価格（ASP）を示している。

表 18.　主要会社各社のセラミックス積層造形材料の平均販売価格（2018-2023、千米ドル/トン）

会社名	2018	2019	2020	2021	2022	2023
3D Cream	87.06	87.74	87.19	85.48	85.14	81.56
ExOne	122.27	120.96	120.73	120.77	119.61	118.86
AGC セラミックス	88.32	88.88	88.75	86.87	86.84	83.81
Formlabs	135.10	134.79	135.17	129.62	128.88	127.30
Lithoz	89.19	88.99	89.13	86.36	90.03	87.50
Prodways	130.10	128.94	129.71	124.68	124.25	121.96
大平洋ランダム	91.09	90.02	90.69	90.70	87.51	83.96
Tethon 3D	97.05	97.26	97.63	96.46	95.95	91.74
長峰製作所	123.46	122.49	121.95	121.05	118.47	114.39
Kwambio	90.16	90.91	89.29	86.42	86.28	84.07
Admatec	93.02	88.71	90.91	85.71	83.09	80.90
その他	80.75	81.18	79.24	76.43	75.53	70.79
平均	98.20	97.63	97.46	95.37	93.88	91.09

出典：上記会社、二次資料、専門家インタビュー、QYResearch, 2023 年

2.4 グローバルセラミックス積層造形材料主要会社の本社所在地と販売地域

表 19.　グローバルセラミックス積層造形材料主要会社の本社所在地と販売地域

会社名	製造拠点	本社
3D Cream	フランス	フランス
ExOne	米国	米国
AGC セラミックス	日本	日本
Formlabs	米国	米国
Lithoz	オーストリア	オーストリア
Prodways	フランス	フランス
大平洋ランダム	日本	日本
Tethon 3D	米国	米国
長峰製作所	日本	日本
Kwambio	ウクライナ	ウクライナ
Admatec	オランダ	オランダ

2.5 セラミックス積層造形材料の市場競合状況

2.5.1 セラミックス積層造形材料の市場集中度（2018-2023）

競合状況を測定するため、標準的なツールとして、ハーフィンダール・ハーシュマン指数（HHI）と集中度（CR(n)）を使用する。

市場集中度は、業界の最大 n 社が所有する市場シェアの割合を意味する。ここで、n は指定された会社の数である。このレポートでは、CR5 を提示し、上位 5 社の市場シェアを意味している。

以下の表は、過去 5 年間以来の市場集中度の詳細を示している。2022 年のセラミックス積層造形材料の売上に関しては、トップ 5 社が市場の 73.35%占めている。

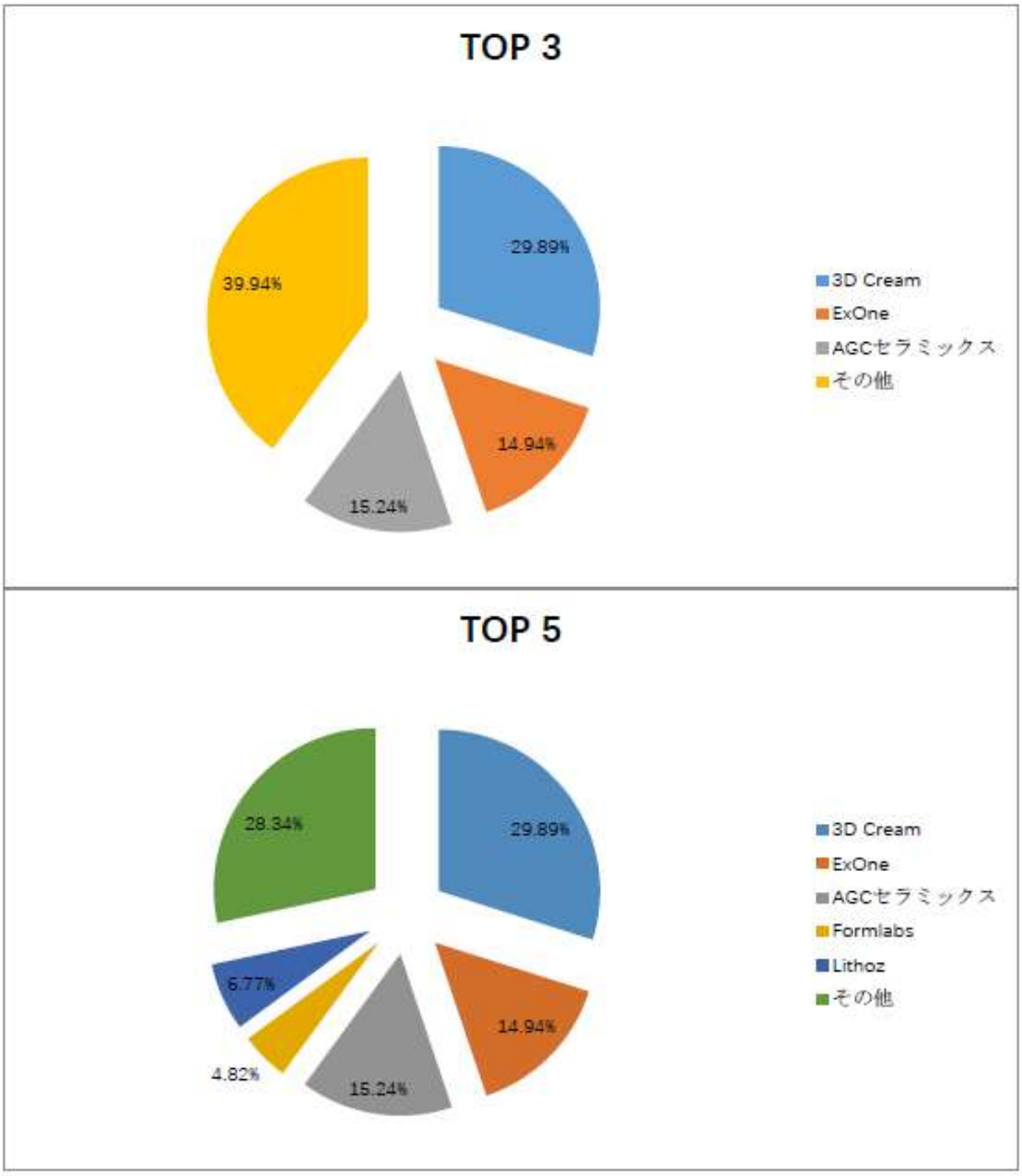
表 20.　グローバルセラミックス積層造形材料の市場集中度(CR5)

会社名	2018	2019	2020	2021	2022	2023
3D Cream	24.91%	25.94%	26.63%	28.59%	27.11%	26.90%
ExOne	19.80%	18.15%	18.46%	20.83%	19.03%	20.26%
AGC セラミックス	20.42%	18.86%	17.56%	14.71%	14.10%	12.31%
Formlabs	7.78%	7.82%	7.90%	6.89%	6.62%	7.30%
Lithoz	7.00%	7.70%	7.71%	6.68%	6.50%	6.71%
CR 5	79.91%	78.45%	78.26%	77.70%	73.35%	73.48%

出典：上記会社、二次資料、QYResearch, 2023 年

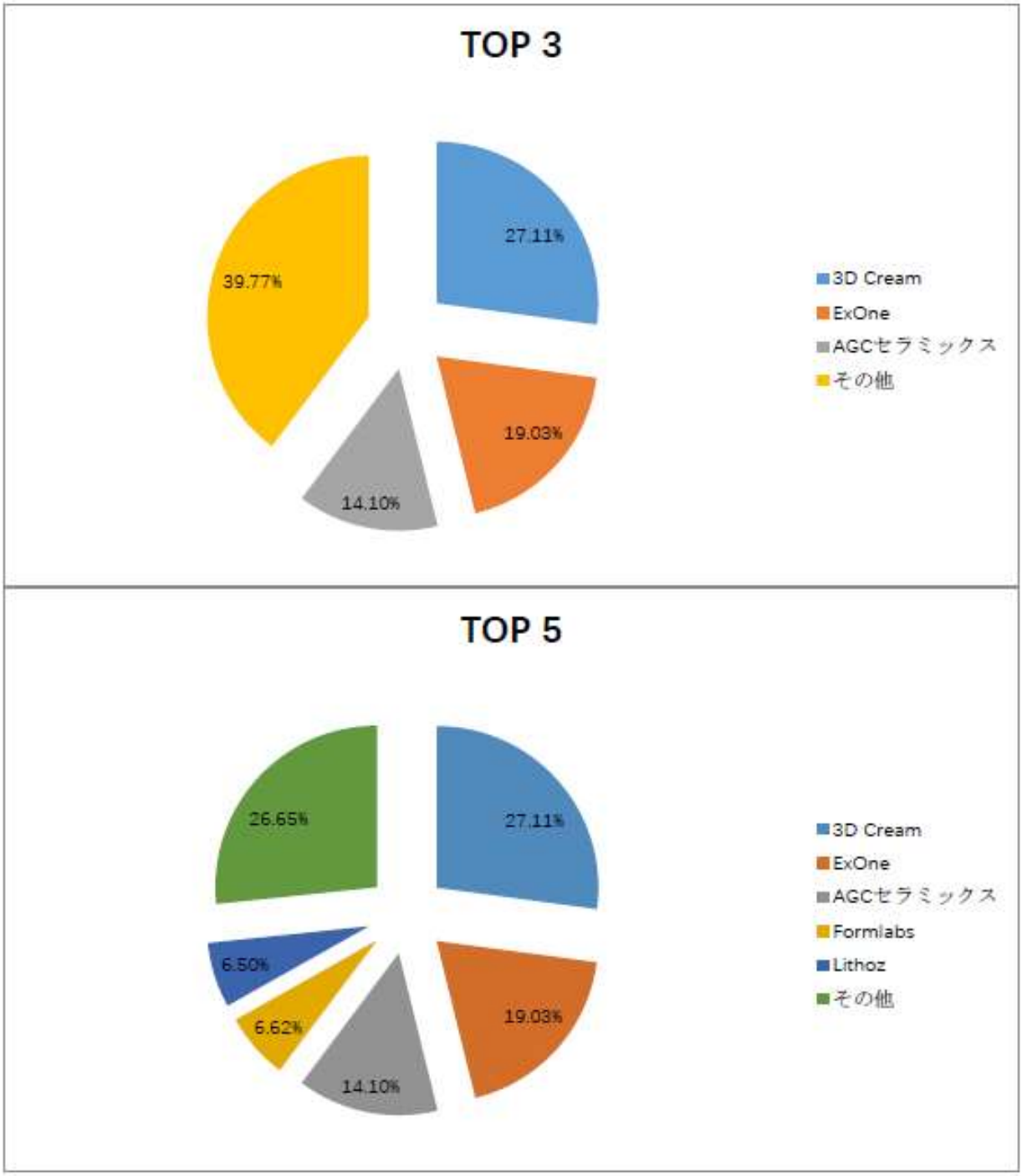
2.5.2 グローバルセラミックス積層造形材料トップ 3 社とトップ 5 社の販売量と売上の市場シェア（20222022）

図 18.　グローバルセラミックス積層造形材料トップ 3 社とトップ 5 社の販売量市場シェア（2022）



出典：上記会社、二次資料、専門家インタビュー、QYResearch、2023 年

図 19.　グローバルセラミックス積層造形材料トップ 3 社とトップ 5 社の売上市場シェア（2022）



出典：上記会社、二次資料、専門家インタビュー、QYResearch、2023 年

2.6 ティア別のグローバル主要会社（ティア 1 、ティア 2 、ティア 3 、2022 年のセラミックス積層造形材料の売上に基づく）

現在、セラミックス積層造形材料の会社は、ティア 1、ティア 2 とティア 3 の間で競争形態を形成している。

注：3 つの階層の会社は、2022 年のセラミックス積層造形材料の売上に基づいて定義

されている。テイア 1=>2 百万米ドル、ティア 2=1 百万米ドル～2 百万米ドル、ティア 3=<1 百万米ドル。

表 21.　ティア別のグローバル主要会社（ティア 1、ティア 2、ティア 3、2022 年のセラミックス積層造形材料の売上に基づく）

会社名	売上（百万米ドル）	ティア別
3D Cream	5.29	ティア 1
ExOne	3.57	ティア 1
AGC セラミックス	2.51	ティア 1
Formlabs	1.23	ティア 2
Lithoz	1.21	ティア 2
Prodways	0.94	ティア 3
大平洋ランダム	0.58	ティア 3
Tethon 3D	0.42	ティア 3
長峰製作所	0.32	ティア 3
Kwambio	0.12	ティア 3
Admatec	0.09	ティア 3
その他	2.09	-
合計	18.36	-

出典：上記会社、二次資料、専門家インタビュー、QYResearch, 2023 年

2.7 セラミックス積層造形材料の設立時期 主要メーカー

以下の表は、セラミックス積層造形材料の主要メーカーの設立時期を示している。

表 22.　セラミックス積層造形材料の主要メーカーの設立時期

会社名	年
3D Cream	2001
ExOne	1995
AGC セラミックス	2002
Formlabs	2011
Lithoz	2011
Prodways	2013
大平洋ランダム	1983
Tethon 3D	2014
長峰製作所	1968
Kwambio	2014
Admatec	2012

出典：上記会社、二次資料、専門家インタビュー、QYResearch, 2023 年

2.8 主要会社のセラミックス積層造形材料の取扱製品

以下の表は、主要会社のセラミックス積層造形材料の取扱製品を示している。

表 23.　主要会社のセラミックス積層造形材料の取扱製品

会社名	取扱製品
3D Cream	3DMIX セラミックペースト
ExOne	フレクセラシリーズ樹脂
AGC セラミックス	ブライトオーブ・セラミック粉末
Formlabs	アルミナ 4N 樹脂、セラミック樹脂
Lithoz	LithaCon シリーズ、LithaLox シリーズ、LithaNit シリーズ、LithaBone シリーズ、LithaCore シリーズ粉末
Prodways	PLASTCure シリーズ樹脂
大平洋ランダム	セラミック粉末
Tethon 3D	ポーセライトセラミック樹脂、テトナイトセラミック粉末
長峰製作所	セラミック・フィラメント
Kwambio	G3 セラミック粉末
Admatec	アドマプリント・セラミックスラリー

出典：上記会社、二次資料、専門家インタビュー、QYResearch, 2023 年

2.9 MM&A 、事業拡大計画

表 24.　M&A、事業拡大計画

日付	事業活動
2021.11	Desktop Metal は、ExOne を買収した。
2022.07	Nano dimension は、Admatec と Formatec を買収した。

出典：上記会社、二次資料、QYResearch, 2023 年

第 3 節：地域別グローバルセラミックス積層造形材料の市場概要

3.1 地域別グローバルセラミックス積層造形材料の売上と CAGRCAGR（2018 vs 2022 vs 2029 2029）

セラミックス積層造形材料市場は、北米、欧州、アジア太平洋、中南米、中東・アフリカの 5 つの地域に分けられる。

表 25.　地域別グローバルセラミックス積層造形材料の売上と CAGR（2018 vs 2022 vs 2029、百万米ル）

地域別	2018	2022	2029	CAGR（2023-2029）
北米	8.67	19.32	80.55	26.52%
欧州	10.39	23.44	99.77	23.30%
アジア太平洋	5.23	13.26	89.40	31.94%
南米	0.00	0.58	2.55	24.04%
中東・アフリカ	0.00	0.51	2.04	22.29%
合計	24.29	57.11	274.31	26.71%

出典：専門家インタビュー、二次資料、QYResearch、2023 年

3.2 地域別グローバルセラミックス積層造形材料の市場規模

表 26.　地域別グローバルセラミックス積層造形材料の販売量（2018-2023、トン）

地域別	2018	2019	2020	2021	2022	2023
北米	87.57	113.71	130.00	165.58	208.54	220.86
欧州	103.79	133.46	151.05	195.02	240.31	298.64
アジア太平洋	56.00	76.79	86.07	114.40	146.99	192.99
南米	0.00	3.94	4.33	5.45	6.64	8.10
中東・アフリカ	0.00	3.45	3.80	4.80	5.88	7.17
合計	247.36	331.35	375.25	485.25	608.36	727.76

出典：二次資料、QYResearch、2023 年

表 27.　地域別グローバルセラミックス積層造形材料の販売量市場シェア（2018-2023）

地域別	2018	2019	2020	2021	2022	2023
北米	35.40%	34.32%	34.64%	34.12%	34.28%	30.35%
欧州	41.96%	40.28%	40.25%	40.19%	39.50%	41.04%
アジア太平洋	22.64%	23.17%	22.94%	23.58%	24.16%	26.52%
南米	0.00%	1.19%	1.15%	1.12%	1.09%	1.11%
中東・アフリカ	0.00%	1.04%	1.01%	0.99%	0.97%	0.99%
合計	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%

出典：二次資料、QYResearch、2023 年

3.2.2 地域別グローバルセラミックス積層造形材料の売上（2018-2023）

表 28.　地域別グローバルセラミックス積層造形材料の売上（2018-2023、百万米ドル）

地域別	2018	2019	2020	2021	2022	2023
北米	8.67	11.23	12.36	15.51	19.32	19.64
欧州	10.39	13.34	15.34	19.25	23.44	28.39
アジア太平洋	5.23	7.13	8.16	10.61	13.26	16.95
南米	0.00	0.35	0.38	0.49	0.58	0.70
中東・アフリカ	0.00	0.30	0.33	0.42	0.51	0.61
合計	24.29	32.35	36.57	46.28	57.11	66.29

出典：専門家インタビュー、二次資料、QYResearch、2023 年

表 29.　地域別グローバルセラミックス積層造形材料の売上市場シェア（2018-2023）

地域別	2018	2019	2020	2021	2022	2023
北米	35.69%	34.71%	33.80%	33.51%	33.83%	29.63%
欧州	42.77%	41.24%	41.95%	41.59%	41.04%	42.83%
アジア太平洋	21.53%	22.04%	22.31%	22.93%	23.22%	25.57%
南米	0.00%	1.08%	1.04%	1.06%	1.02%	1.06%
中東・アフリカ	0.00%	0.93%	0.90%	0.91%	0.89%	0.92%
合計	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%

出典：専門家インタビュー、二次資料、QYResearch、2023 年

3.2.3 グローバルセラミックス積層造形材料の販売量、売上、価格、粗利益率（2018 20232023）

表 30.　グローバルセラミックス積層造形材料の販売量、売上、価格、粗利益率（2018-2023）

グローバル	2018	2019	2020	2021	2022	2023
販売量（トン）	247.36	331.35	375.25	485.25	608.36	727.76
売上（百万米ドル）	24.29	32.35	36.57	46.28	57.11	66.29
価格（千米ドル/トン）	98.20	97.63	97.46	95.37	93.88	91.09
粗利益率	33.45%	32.56%	31.85%	32.09%	32.14%	31.52%

出典：専門家インタビュー、二次資料、QYResearch、2023 年

3.3 地域別グローバルセラミックス積層造形材料の市場規模予測

3.3.1 地域別グローバルセラミックス積層造形材料の販売量（2024 20292029）

表 31.　地域別グローバルセラミックス積層造形材料の販売量（2024-2029、トン）

地域別	2024	2025	2026	2027	2028	2029
北米	273.87	393.81	504.11	635.88	818.83	980.68
欧州	374.02	485.63	570.59	695.33	916.12	1,141.04
アジア太平洋	255.25	343.22	480.22	623.22	846.50	1,108.67
南米	9.97	13.05	18.72	23.96	26.19	32.04
中東・アフリカ	8.87	10.16	14.69	17.68	22.73	25.90
合計	921.98	1,245.87	1,588.33	1,996.07	2,630.37	3,288.33

出典：二次資料、QYResearch、2023 年

表 32.　地域別グローバルセラミックス積層造形材料の販売量市場シェア（2024-2029）

地域別	2024	2025	2026	2027	2028	2029
北米	29.70%	31.61%	31.74%	31.86%	31.13%	29.82%
欧州	40.57%	38.98%	35.92%	34.83%	34.83%	34.70%
アジア太平洋	27.68%	27.55%	30.23%	31.22%	32.18%	33.72%
南米	1.08%	1.05%	1.18%	1.20%	1.00%	0.97%
中東・アフリカ	0.96%	0.82%	0.92%	0.89%	0.86%	0.79%
合計	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%

3.3.2 地域別グローバルセラミックス積層造形材料の売上（2024 20292029）

表 33.　地域別グローバルセラミックス積層造形材料の売上（2024-2029、百万米ドル）

地域別	2024	2025	2026	2027	2028	2029
北米	23.75	33.47	42.26	54.44	68.60	80.55
欧州	34.84	44.38	51.11	63.45	82.00	99.77
アジア太平洋	22.04	29.03	39.80	52.74	70.19	89.40
南米	0.84	1.08	1.52	1.98	2.12	2.55
中東・アフリカ	0.74	0.84	1.19	1.45	1.83	2.04
合計	82.21	108.80	135.88	174.06	224.74	274.31

出典：専門家インタビュー、二次資料、QYResearch、2023 年

表 34.　地域別グローバルセラミックス積層造形材料の売上市場シェア（2024-2029）

地域別	2024	2025	2026	2027	2028	2029
北米	28.89%	30.76%	31.10%	31.28%	30.52%	29.36%
欧州	42.38%	40.79%	37.61%	36.45%	36.49%	36.37%
アジア太平洋	26.81%	26.68%	29.29%	30.30%	31.23%	32.59%
南米	1.02%	0.99%	1.12%	1.14%	0.94%	0.93%
中東・アフリカ	0.90%	0.77%	0.88%	0.83%	0.81%	0.74%
合計	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%

出典：専門家インタビュー、二次資料、QYResearch、2023 年

3.3.3 グローバルセラミックス積層造形材料の販売量、売上、価格、粗利益率（2024 20292029）

表 35.　グローバルセラミックス積層造形材料の販売量、売上、価格、粗利益率（2024-2029）

グローバル	2024	2025	2026	2027	2028	2029
販売量（トン）	921.98	1,245.87	1,588.33	1,996.07	2,630.37	3,288.33
売上（百万米ドル）	89.17	87.33	85.55	87.20	85.44	83.42
価格（千米ドル/トン）	82.21	108.80	135.88	174.06	224.74	274.31
粗利益率	31.17%	30.06%	31.77%	28.89%	29.93%	27.38%

出典：専門家インタビュー、二次資料、QYResearch、2023 年

第 4 節：用途別セラミックス積層造形材料の市場概要

4.1 用途別セラミックス積層造形材料の市場概要

セラミックス積層造形材料は用途により、主にヘルスケア・航空宇宙・防衛、自動車などに分けられる。

4.1.1 ヘルスケア

セラミック積層造形は、ヘルスケア分野で大きな将来性と用途を示し、高度なカスタマイズ、患者の転帰の改善、医療機器製造の強化の可能性を提供している。ここでは、ヘルスケアにおけるセラミック 3D プリンティングの主な用途と利点を紹介する：

カスタマイズされたインプラント：

セラミック 3D プリンティングは、歯科用インプラントや整形外科用インプラントなど、患者に合わせたインプラントの製造を可能にする。これらのインプラントは、患者の解剖学的構造に合わせて調整することができ、より良いフィット感と全体的な性能の向上につながる。

歯科用アプリケーション：

歯科では、セラミック 3D プリンティングが歯冠、ブリッジ、その他の修復物の製作に利用されている。非常に詳細でカスタマイズされたセラミック歯科補綴物を製作でき

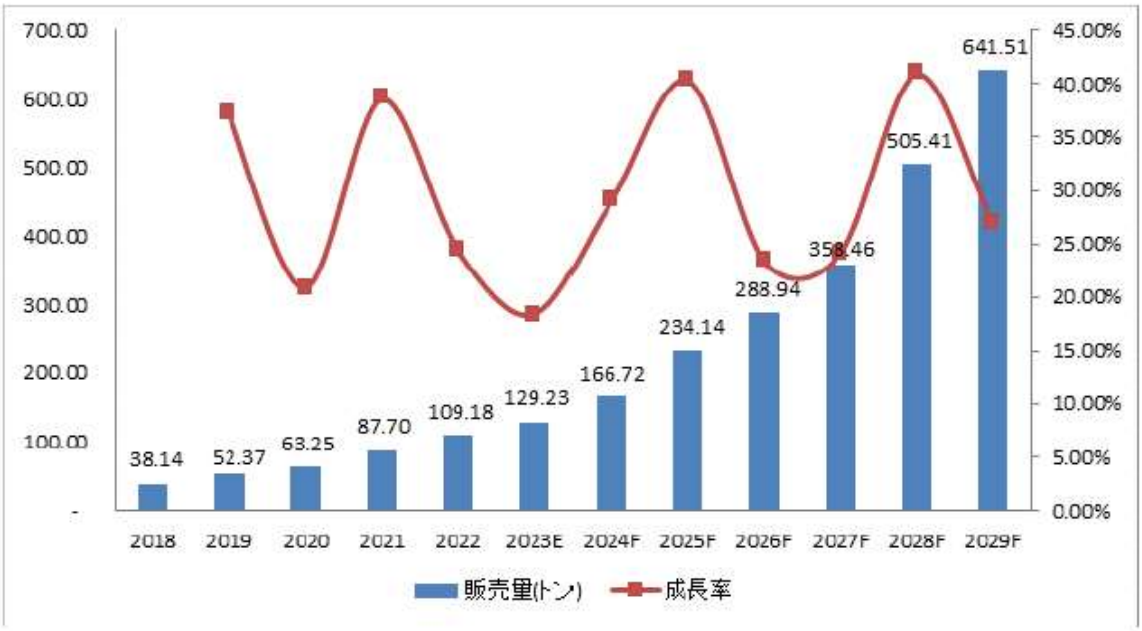
るため、審美的な結果と患者の快適性が向上する。
生体適合材料：
アルミナやジルコニアなど、3D プリンティングで使用されるセラミックの多くは生体適合性がある。そのため、人体に直接触れるインプラントやデバイスの製造に適しており、副作用のリスクを最小限に抑えることができる。
骨組織工学：
セラミック 3D プリンティングは、天然骨の構造を模倣した足場を作成するための組織工学の分野で研究されている。これらの足場は骨再生の骨組みとして機能し、徐々に天然の骨組織に置き換わっていく。
薬物送達装置：
3D プリンティングは、薬物送達デバイス用の複雑なセラミック構造の製造を可能にする。これらのデバイスからの薬剤の制御放出は、患者のニーズに基づいて調整することができ、治療効果を向上させる。
手術計画モデル：
3D プリントされたセラミックモデルは、手術計画やトレーニングに使用できる。外科医は患者固有の解剖学的構造を視覚化することができ、術前計画を強化し、手術中の合併症のリスクを軽減することができる。
補綴と矯正：
セラミック 3D プリンティングは、軽量で耐久性のある補綴物や装具の製造に利用されている。カスタマイズは、個々の患者に快適なフィット感を保証する上で特に有益である。
診断ツール：
3D プリントされたセラミック部品は、画像ファントムやその他の医療機器を含む診断ツールや機器の開発に使用することができる。これらのツールは診断や医学研究を助ける。
セラミックセンサーとエレクトロニクス：
3D プリンティングは、セラミック部品をセンサーや電子機器に組み込むことを可能にする。これは、バイタルサインやその他の健康パラメータをモニターするための医療機器に応用できる。
外科用器具：
セラミック 3D プリンティングによって、複雑な形状を持つカスタマイズされた手術器具を製造することができる。これにより、特定の外科手術に合わせた器具の作成が容易になる。

図 20.　ヘルスケアの製品写真



出典：二次資料、QYResearch、2023 年

図 21.　ヘルスケア　グローバルセラミックス積層造形材料の販売量と成長率（2018-2029、トン）



出典：二次資料、専門家インタビュー、QYResearch、2023 年

4.1.2 航空宇宙・防衛

セラミックス積層造形は、航空宇宙および防衛産業等、要求の厳しい環境において、極めて重要な特性を持つ部品の製造に適している。

図 22.　航空宇宙・防衛の製品写真



出典：二次資料、QYResearch、2023 年

図 23.　航空宇宙・防衛　グローバルセラミックス積層造形材料の販売量と成長率 (2018-2029、トン)



出典：二次資料、専門家インタビュー、QYResearch、2023 年

4.1.3 自動車

自動車産業におけるセラミックス積層造形（3D プリンティング）は、ユニークな特性を持つ高性能部品を製造する可能性があるとして注目を集めている。ここでは、自動車分野におけるセラミック積層造形の用途と利点をいくつか紹介する：

エンジン・コンポーネント：

高温耐性と強度で知られるセラミックは、ピストン、シリンダーライナー、バルブなどのエンジン部品に使用されている。積層造形では、性能を向上させた複雑でカスタ

マイズされたセラミック部品を作ることができる。

排気システム：

セラミック材料は高温や腐食環境に耐えることができるため、排気システムでの使用に適している。アディティブ・マニュファクチャリングは、複雑で耐熱性のある部品の製造を可能にし、効率と排ガス制御の向上に貢献する。

ブレーキ・コンポーネント：

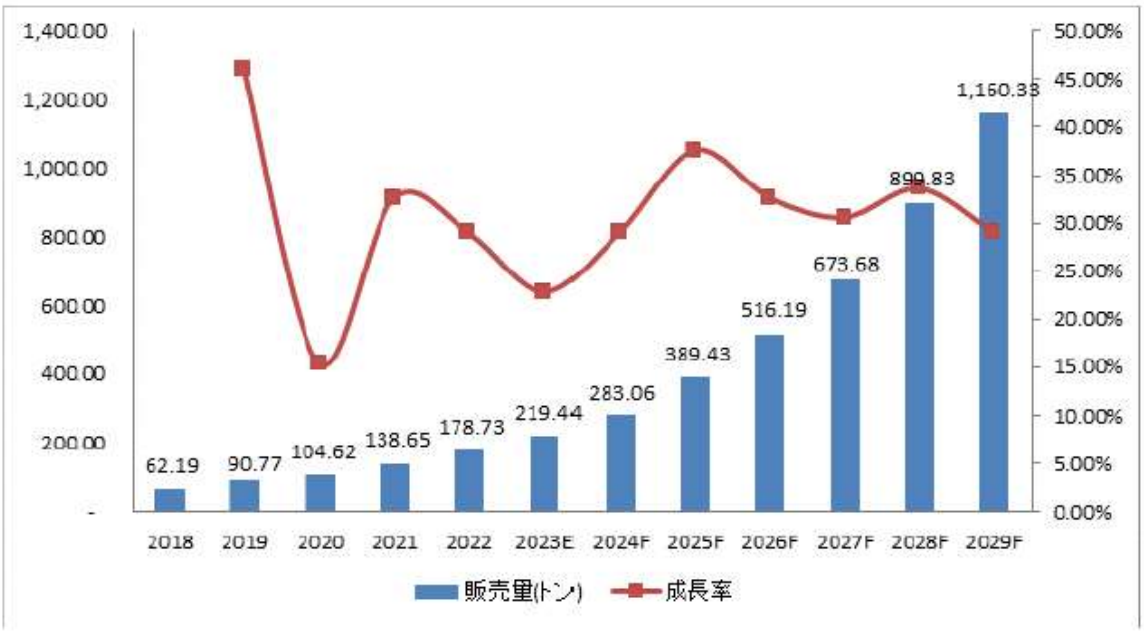
ブレーキパッドやローターなどのセラミック製ブレーキ部品は、耐熱性や耐摩耗性などの高性能特性で知られている。積層造形は、カスタマイズされた軽量セラミックブレーキ部品の製造に利用できる。

図 24.　自動車の製品写真



出典：二次資料、QYResearch、2023 年

図 25.　自動車　グローバルセラミックス積層造形材料の販売量と成長率（2018-2029、トン）



出典：二次資料、専門家インタビュー、QYResearch、2023 年

4.1.4 その他

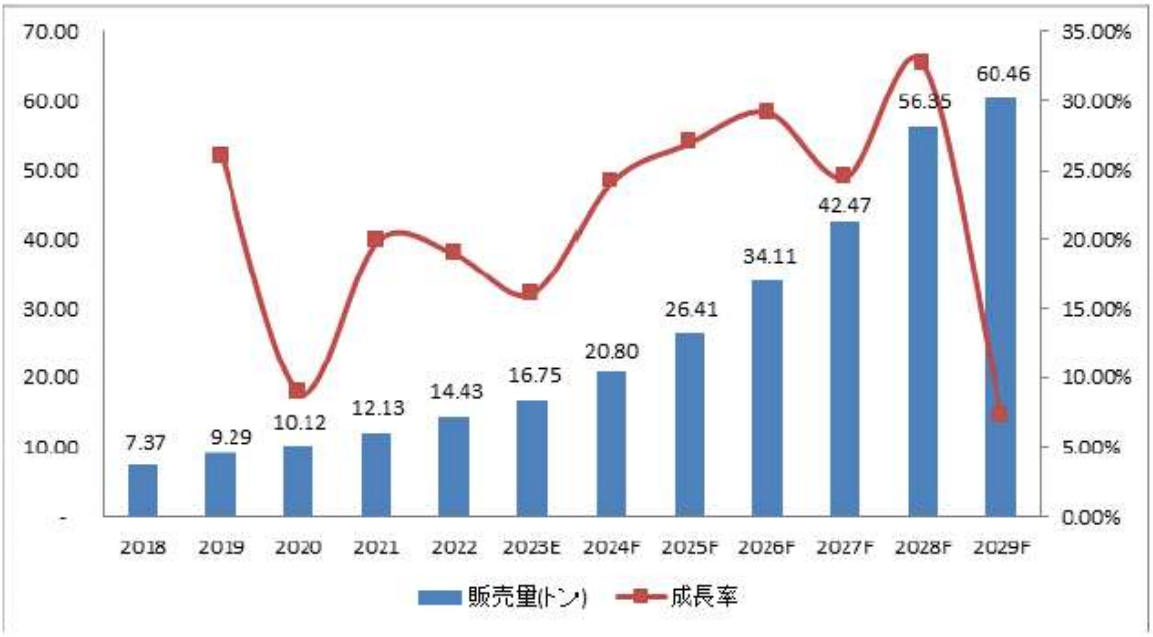
その他、家庭用品、装飾品、宝飾品、半導体、電子機器などがある。

図 26.　その他の製品写真



出典：二次資料、QYResearch、2023 年

図 27.　その他　グローバルセラミックス積層造形材料の販売量と成長率（2018-2029、トン）



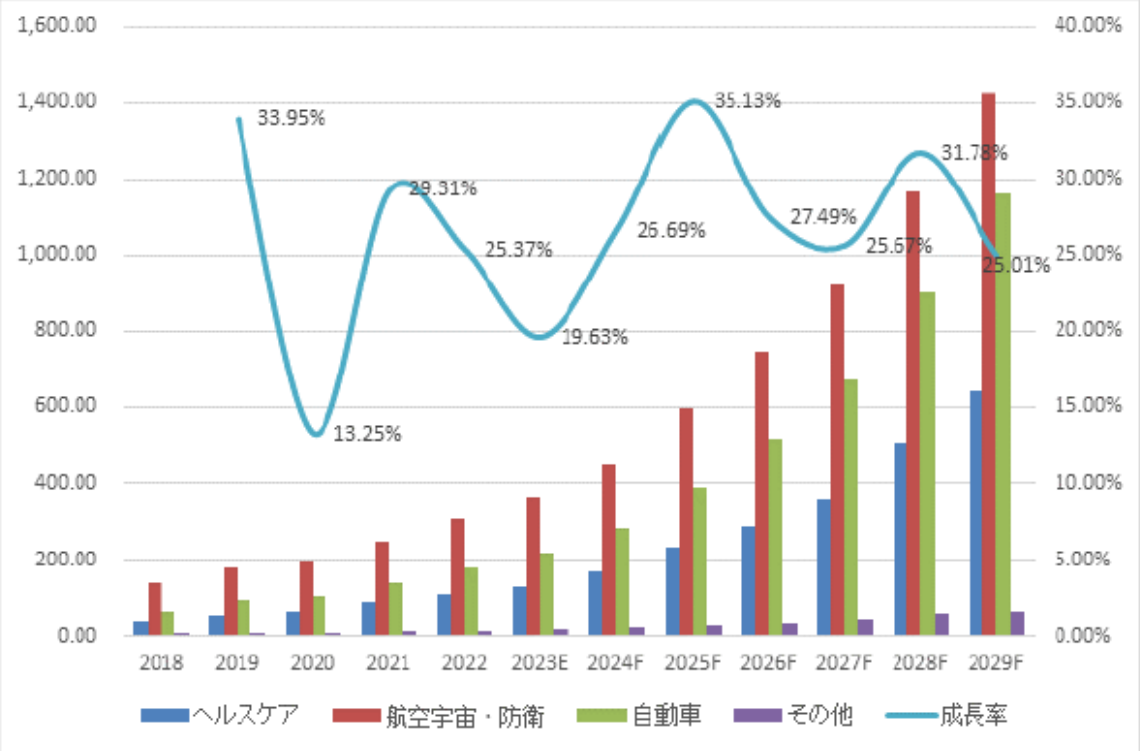
出典：二次資料、専門家インタビュー、QYResearch、2023 年

4.2 用途別グローバルセラミックス積層造形材料の市場規模

このセクションでは、2018 年から 2029 年までの用途別セラミックス積層造形材料の市場規模と予測を表示する。

CAGR（2023-2029）は、用途別の売上と市場全体の売上に基づいて算出される。

図 28.　用途別グローバルセラミックス積層造形材料の販売量（2018-2029、トン）



出典：二次資料、専門家インタビュー、QYResearch、2023 年

4.2.2 用途別グローバルセラミックス積層造形材料の市場規模（2018 20232023）

表 36.　用途別グローバルセラミックス積層造形材料の販売量（2018-2023、トン）

用途別	2018	2019	2020	2021	2022	2023
ヘルスケア	38.14	52.37	63.25	87.70	109.18	129.23
航空宇宙・防衛	139.66	178.92	197.26	246.77	306.02	362.34
自動車	62.19	90.77	104.62	138.65	178.73	219.44
その他	7.37	9.29	10.12	12.13	14.43	16.75
合計	247.36	331.35	375.25	485.25	608.36	727.76

出典：専門家インタビュー、二次資料、QYResearch、2023 年

表 37.　用途別グローバルセラミックス積層造形材料の販売量市場シェア（2018-2023）

用途別	2018	2019	2020	2021	2022	2023
ヘルスケア	15.42%	15.81%	16.86%	18.07%	17.95%	17.76%
航空宇宙・防衛	56.46%	54.00%	52.57%	50.85%	50.30%	49.79%
自動車	25.14%	27.39%	27.88%	28.57%	29.38%	30.15%
その他	2.98%	2.80%	2.70%	2.50%	2.37%	2.30%
合計	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%

出典：専門家インタビュー、二次資料、QYResearch、2023 年

4.2.3 用途別グローバルセラミックス積層造形材料の市場規模予測（2024 20292029）

表 38.　用途別グローバルセラミックス積層造形材料の販売量（2024-2029、トン）

用途別	2024	2025	2026	2027	2028	2029
ヘルスケア	166.72	234.14	288.94	358.46	505.41	641.51
航空宇宙・防衛	451.40	595.89	749.09	921.46	1168.78	1426.03
自動車	283.06	389.43	516.19	673.68	899.83	1160.33
その他	20.80	26.41	34.11	42.47	56.35	60.46
合計	921.98	1245.87	1588.33	1996.07	2630.37	3288.33

出典：専門家インタビュー、二次資料、QYResearch、2023 年

表 39.　用途別グローバルセラミックス積層造形材料の販売量市場シェア（2024-2029）

用途別	2024	2025	2026	2027	2028	2029
ヘルスケア	18.08%	18.79%	18.19%	17.96%	19.21%	19.51%
航空宇宙・防衛	48.96%	47.83%	47.16%	46.16%	44.43%	43.37%
自動車	30.70%	31.26%	32.50%	33.75%	34.21%	35.29%
その他	2.26%	2.12%	2.15%	2.13%	2.14%	1.84%
合計	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%

出典：専門家インタビュー、二次資料、QYResearch、2023 年

4.3 主要地域における用途別の市場規模

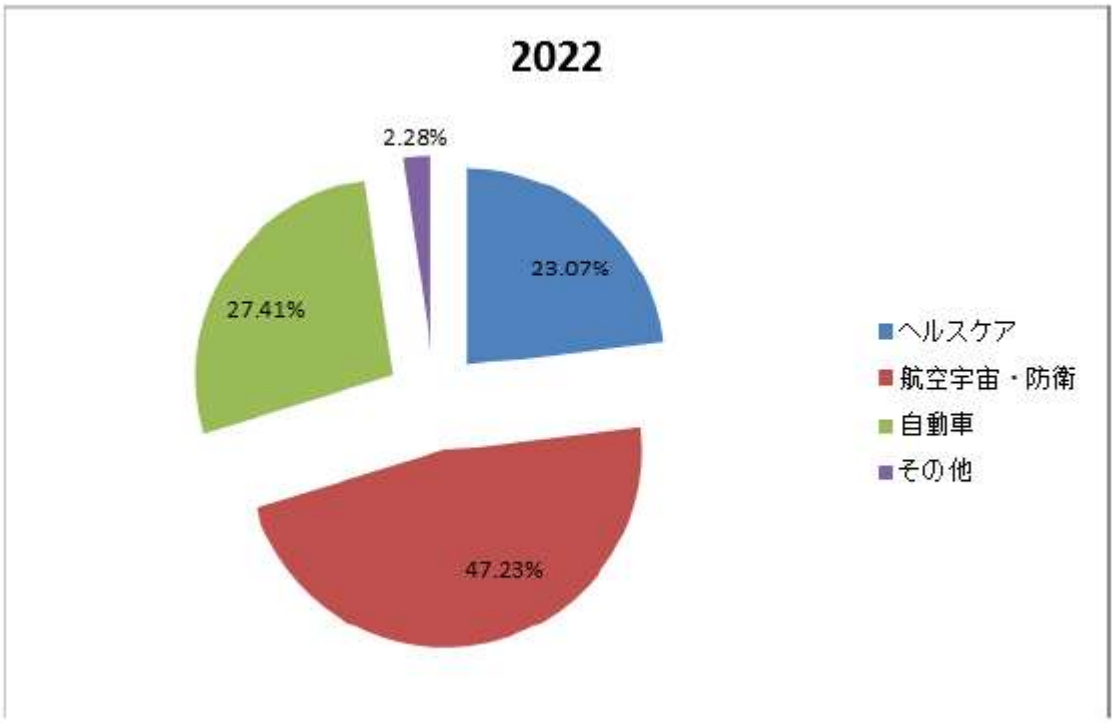
4.3.1 北米 用途別セラミックス積層造形材料の市場規模（2018 20232023）

表 40.　北米 用途別セラミックス積層造形材料の販売量（2018-2023、トン）

北米	2018	2019	2020	2021	2022	2023
ヘルスケア	13.73	18.92	24.25	37.09	48.12	48.94
航空宇宙・防衛	49.41	60.60	66.68	79.80	98.49	107.76
自動車	21.79	30.99	35.60	44.67	57.17	58.99
その他	2.64	3.20	3.47	4.02	4.76	5.17
合計	87.57	113.71	130.00	165.58	208.54	220.86

出典：専門家インタビュー、二次資料、QYResearch、2023 年

図 29.　北米 用途別セラミックス積層造形材料の販売量市場シェア（2022）



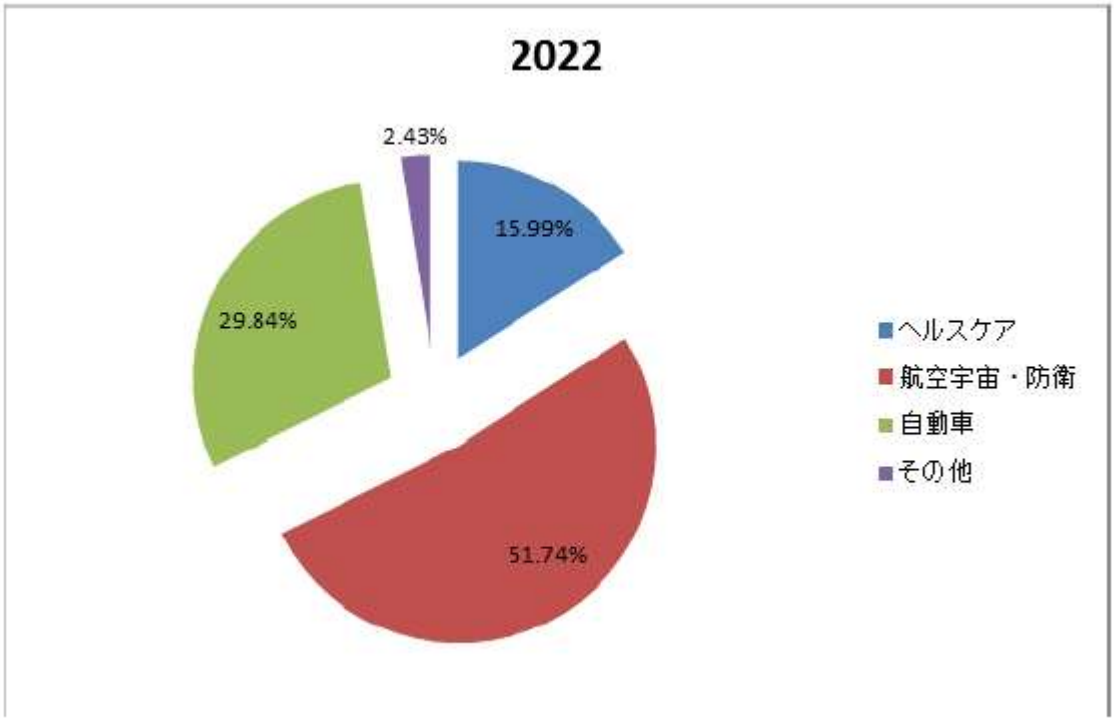
出典：専門家インタビュー、二次資料、QYResearch、2023 年

4.3.2 欧州 用途別セラミックス積層造形材料の市場規模（2018 20232023）

表 41.　欧州 用途別セラミックス積層造形材料の販売量（2018-2023、トン）

欧州	2018	2019	2020	2021	2022	2023
ヘルスケア	15.83	20.52	25.15	33.24	38.42	49.62
航空宇宙・防衛	58.69	72.74	79.97	100.85	124.34	150.38
自動車	26.19	36.44	41.84	56.00	71.71	91.73
その他	3.08	3.76	4.09	4.93	5.84	6.91
合計	103.79	133.46	151.05	195.02	240.31	298.64

図 30.　欧州 用途別セラミックス積層造形材料の販売量市場シェア（2022）



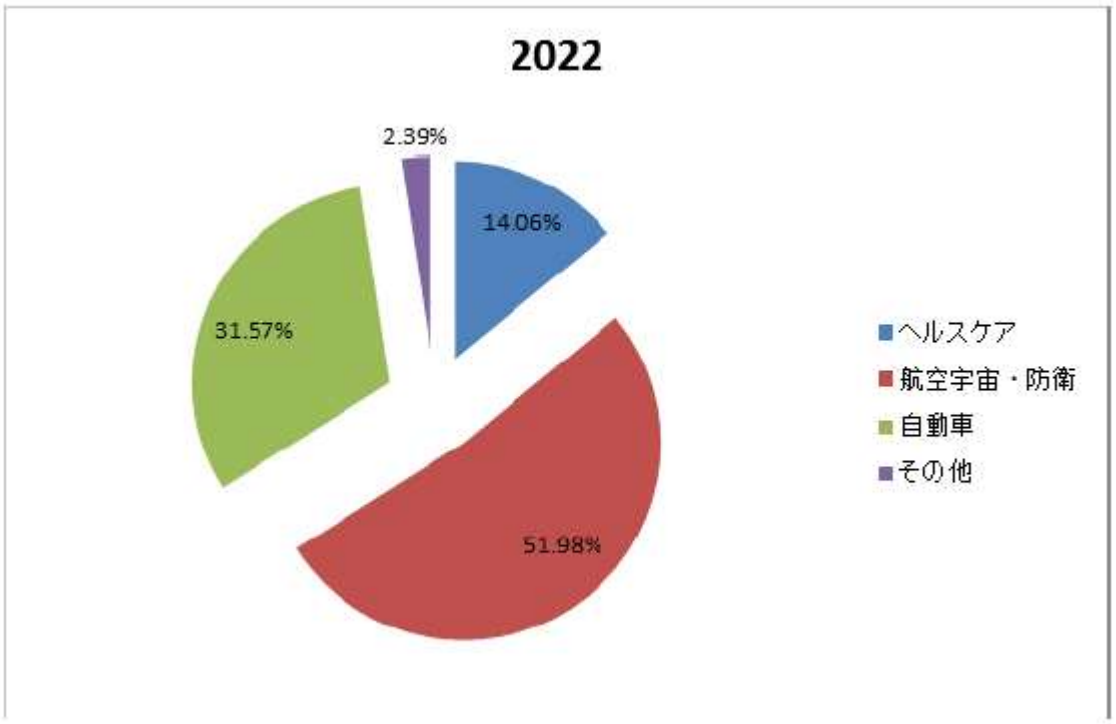
出典：専門家インタビュー、二次資料、QYResearch、2023 年

4.3.3 アジア太平洋 用途別セラミックス積層造形材料の市場規模（2018 20232023）

表 42.　アジア太平洋 用途別セラミックス積層造形材料の販売量（2018-2023、トン）

アジア太平洋	2018	2019	2020	2021	2022	2023
ヘルスケア	8.58	11.71	12.54	15.72	20.67	28.08
航空宇宙・防衛	31.56	41.46	46.11	60.52	76.41	96.14
自動車	14.21	21.50	25.09	35.25	46.40	64.47
その他	1.65	2.12	2.33	2.91	3.51	4.30
合計	56.00	76.79	86.07	114.40	146.99	192.99

図 31.　アジア太平洋 用途別セラミックス積層造形材料の販売量市場シェア（2022）



出典：専門家インタビュー、二次資料、QYResearch, 2023 年

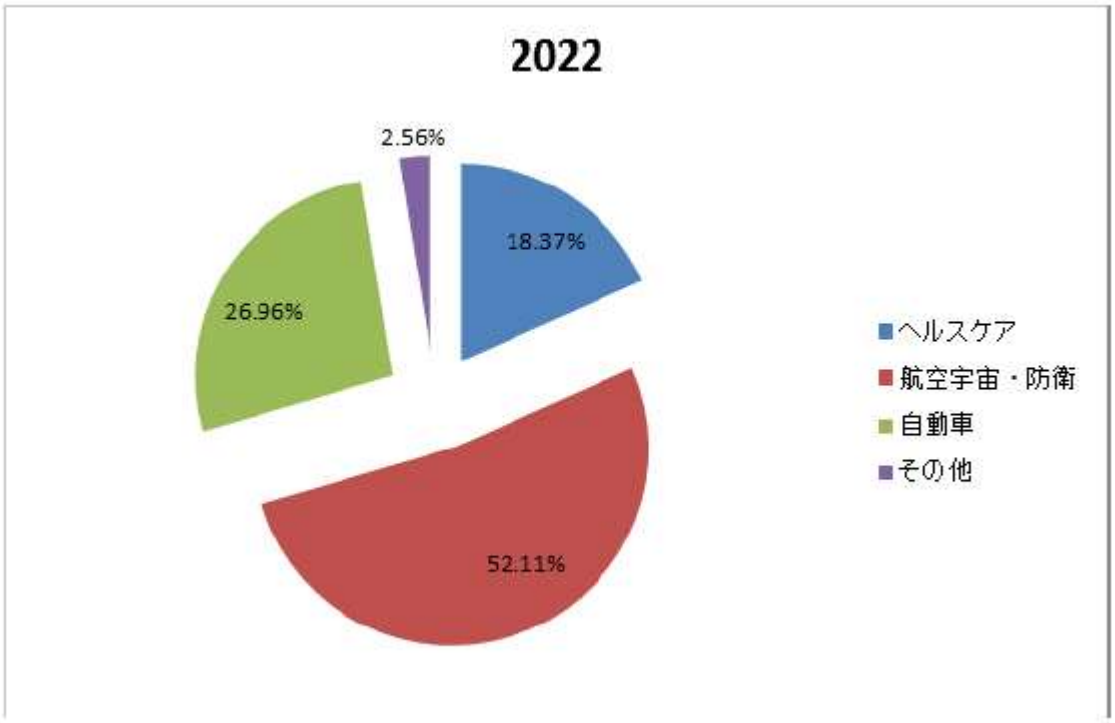
4.3.4 南米 用途別セラミックス積層造形材料の市場規模（2018 20232023）

表 43.　南米 用途別セラミックス積層造形材料の販売量（2018-2023、トン）

南米	2018	2019	2020	2021	2022	2023
ヘルスケア	0.00	0.72	0.78	1.02	1.22	1.56
航空宇宙・防衛	0.00	2.14	2.34	2.88	3.46	4.12
自動車	0.00	0.97	1.09	1.41	1.79	2.22
その他	0.00	0.11	0.12	0.14	0.17	0.20
合計	0.00	3.94	4.33	5.45	6.64	8.10

出典：専門家インタビュー、二次資料、QYResearch, 2023 年

図 32.　南米 用途別セラミックス積層造形材料の販売量市場シェア（2022）



出典：専門家インタビュー、二次資料、QYResearch、2023 年

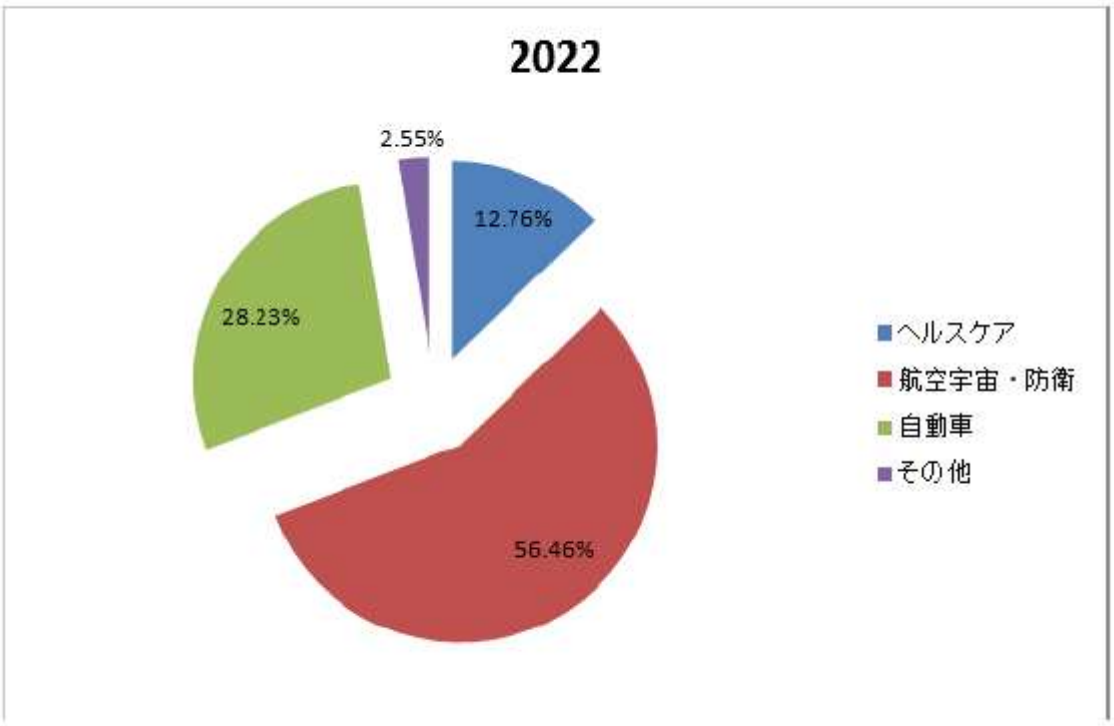
4.3.5 中東・アフリカ 用途別セラミックス積層造形材料の市場規模（2018 20232023）

表 44.　中東・アフリカ 用途別セラミックス積層造形材料の販売量（2018-2023、トン）

中東・アフリカ	2018	2019	2020	2021	2022	2023
ヘルスケア	0.00	0.50	0.53	0.63	0.75	1.03
航空宇宙・防衛	0.00	1.98	2.16	2.72	3.32	3.94
自動車	0.00	0.87	1.00	1.32	1.66	2.03
その他	0.00	0.10	0.11	0.13	0.15	0.17
合計	0.00	3.45	3.80	4.80	5.88	7.17

出典：専門家インタビュー、二次資料、QYResearch、2023 年

図 33.　中東・アフリカ 用途別セラミックス積層造形材料の販売量市場シェア（2022）



出典：専門家インタビュー、二次資料、QYResearch, 2023 年

第 5 節： 北米 国別のセラミックス積層造形材料の市場規模

5.1 北米 国別のセラミックス積層造形材料の市場規模

5.1.1 北米 国別のセラミックス積層造形材料の売上と CAGRCAGR（2018 vs 2022 vs 2029 2029）

表 45.　北米 国別のセラミックス積層造形材料の売上と CAGR（2018 vs 2022 vs 2029、百万米ドル）

北米	2018	2022	2029	CAGR (2023-2029)
米国	6.95	15.84	67.70	27.15%
カナダ	1.03	2.21	8.23	24.04%
メキシコ	0.69	1.27	4.62	22.61%
合計	8.67	19.32	80.55	26.52%

出典：専門家インタビュー、二次資料、QYResearch, 2023 年

5.1.2 北米 国別のセラミックス積層造形材料の販売量（2018 20232023）

表 46.　北米 国別のセラミックス積層造形材料の販売量（2018-2023、トン）

北米	2018	2019	2020	2021	2022	2023
米国	69.40	89.36	103.21	131.63	169.94	180.15
カナダ	10.72	14.50	16.23	20.94	24.64	25.67
メキシコ	7.45	9.85	10.56	13.01	13.96	15.04
合計	87.57	113.71	130.00	165.58	208.54	220.86

出典：二次資料、QYResearch、2023 年

表 47.　北米 国別のセラミックス積層造形材料の販売量市場シェア（2018-2023）

北米	2018	2019	2020	2021	2022	2023
米国	79.25%	78.59%	79.39%	79.50%	81.49%	81.57%
カナダ	12.24%	12.75%	12.48%	12.65%	11.82%	11.62%
メキシコ	8.51%	8.66%	8.12%	7.86%	6.69%	6.81%
合計	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%

出典：二次資料、QYResearch、2023 年

5.1.3 北米 国別のセラミックス積層造形材料の売上（2018 20232023）

表 48.　北米 国別のセラミックス積層造形材料の売上（2018-2023、百万米ドル）

北米	2018	2019	2020	2021	2022	2023
米国	6.95	8.94	9.86	12.42	15.84	16.02
カナダ	1.03	1.37	1.50	1.90	2.21	2.26
メキシコ	0.69	0.92	1.00	1.19	1.27	1.36
合計	8.67	11.23	12.36	15.51	19.32	19.64

出典：専門家インタビュー、二次資料、QYResearch、2023 年

表 49.　北米 国別のセラミックス積層造形材料の売上市場シェア（2018-2023）

北米	2018	2019	2020	2021	2022	2023
米国	80.16%	79.61%	79.77%	80.08%	81.99%	81.57%
カナダ	11.88%	12.20%	12.14%	12.25%	11.44%	11.51%
メキシコ	7.96%	8.19%	8.09%	7.67%	6.57%	6.92%
合計	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%

出典：専門家インタビュー、二次資料、QYResearch、2023 年

5.2 北米 国別のセラミックス積層造形材料の市場規模予測

5.2.1 北米 国別のセラミックス積層造形材料の販売量（2024 20292029）

表 50.　北米 国別のセラミックス積層造形材料の販売量（2024-2029、トン）

北米	2024	2025	2026	2027	2028	2029
米国	225.13	327.36	419.74	532.30	690.07	820.00
カナダ	30.97	43.21	53.10	65.74	80.37	104.05
メキシコ	17.77	23.24	31.27	37.84	48.39	56.63
合計	273.87	393.81	504.11	635.88	818.83	980.68

出典：二次資料、QYResearch、2023 年

表 51.　北米 国別のセラミックス積層造形材料の販売量市場シェア（2024-2029）

北米	2024	2025	2026	2027	2028	2029
米国	82.20%	83.13%	83.26%	83.71%	84.28%	83.62%
カナダ	11.31%	10.97%	10.53%	10.34%	9.82%	10.61%
メキシコ	6.49%	5.90%	6.20%	5.95%	5.91%	5.77%
合計	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%

出典：二次資料、QYResearch、2023 年

5.2.2 北米 国別のセラミックス積層造形材料の売上（2024 20292029）

表 52.　北米 国別のセラミックス積層造形材料の売上（2024-2029、百万米ドル）

北米	2024	2025	2026	2027	2028	2029
米国	19.51	27.80	35.18	45.90	58.19	67.70
カナダ	2.66	3.65	4.41	5.36	6.43	8.23
メキシコ	1.58	2.02	2.67	3.18	3.98	4.62
合計	23.75	33.47	42.26	54.44	68.60	80.55

出典：専門家インタビュー、二次資料、QYResearch、2023 年

表 53.　北米 国別のセラミックス積層造形材料の売上市場シェア（2024-2029）

北米	2024	2025	2026	2027	2028	2029
米国	82.15%	83.06%	83.25%	84.31%	84.83%	84.05%
カナダ	11.20%	10.91%	10.44%	9.85%	9.37%	10.22%
メキシコ	6.65%	6.04%	6.32%	5.84%	5.80%	5.74%
合計	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%

出典：専門家インタビュー、二次資料、QYResearch、2023 年

第 6 節： 欧州 国別のセラミックス積層造形材料の市場概要

6.1 欧州 国別のセラミックス積層造形材料の市場規模

6.1.1 欧州 国別のセラミックス積層造形材料の売上と CAGRCAGR（2018 vs 2022 vs 2029 2029）

表 54.　欧州 国別のセラミックス積層造形材料の売上と CAGR（2018 vs 2022 vs 2029、百万米ドル）

欧州	2018	2022	2029	CAGR（2023-2029）
ドイツ	1.84	6.59	29.52	24.92%
フランス	3.19	6.44	31.30	22.48%
英国	1.73	3.24	15.59	22.78%
イタリア	0.80	2.01	6.70	23.37%
ロシア	0.97	1.49	3.16	20.54%
その他	1.86	3.67	13.50	23.15%
合計	10.39	23.44	99.77	23.30%

出典：専門家インタビュー、二次資料、QYResearch、2023 年

6.1.2 欧州 国別のセラミックス積層造形材料の販売量（2018 20232023）

表 55.　欧州 国別のセラミックス積層造形材料の販売量（2018-2023、トン）

欧州	2018	2019	2020	2021	2022	2023
ドイツ	18.36	27.71	32.81	46.12	64.93	79.58
フランス	30.99	38.02	43.14	54.52	66.22	98.08
英国	17.29	21.48	23.77	29.15	34.01	48.95
イタリア	8.30	10.81	12.08	16.34	21.48	20.64
ロシア	9.83	12.61	13.84	17.73	15.88	10.71
その他	19.02	22.83	25.41	31.16	37.79	40.68
合計	103.79	133.46	151.05	195.02	240.31	298.64

出典：二次資料、QYResearch、2023 年

表 56.　欧州 国別のセラミックス積層造形材料の販売量市場シェア（2018-2023）

欧州	2018	2019	2020	2021	2022	2023
ドイツ	17.68%	20.76%	21.72%	23.65%	27.02%	26.65%
フランス	29.86%	28.49%	28.56%	27.96%	27.56%	32.84%
英国	16.66%	16.09%	15.74%	14.95%	14.15%	16.39%
イタリア	8.00%	8.10%	8.00%	8.38%	8.94%	6.91%
ロシア	9.47%	9.45%	9.16%	9.09%	6.61%	3.59%
その他	18.33%	17.11%	16.82%	15.98%	15.73%	13.62%
合計	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%

出典：二次資料、QYResearch、2023 年

6.1.3 欧州 国別のセラミックス積層造形材料の売上（2018 20232023）

表 57.　欧州 国別のセラミックス積層造形材料の売上（2018-2023、百万米ドル）

欧州	2018	2019	2020	2021	2022	2023
ドイツ	1.84	2.87	3.43	4.69	6.59	7.77
フランス	3.19	3.83	4.42	5.41	6.44	9.27
英国	1.73	2.08	2.33	2.80	3.24	4.55
イタリア	0.80	1.05	1.20	1.57	2.01	1.90
ロシア	0.97	1.22	1.37	1.70	1.49	1.03
その他	1.86	2.29	2.59	3.08	3.67	3.87
合計	10.39	13.34	15.34	19.25	23.44	28.39

出典：専門家インタビュー、二次資料、QYResearch、2023 年

表 58.　欧州 国別のセラミックス積層造形材料の売上市場シェア（2018-2023）

欧州	2018	2019	2020	2021	2022	2023
ドイツ	17.71%	21.51%	22.36%	24.36%	28.11%	27.37%
フランス	30.70%	28.71%	28.81%	28.10%	27.47%	32.65%
英国	16.65%	15.59%	15.19%	14.55%	13.82%	16.03%
イタリア	7.70%	7.87%	7.82%	8.16%	8.58%	6.69%
ロシア	9.34%	9.15%	8.93%	8.83%	6.36%	3.63%
その他	17.90%	17.17%	16.88%	16.00%	15.66%	13.63%
合計	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%

出典：専門家インタビュー、二次資料、QYResearch、2023 年

6.2 欧州 国別のセラミックス積層造形材料の市場規模予測

6.2.1 欧州 国別のセラミックス積層造形材料の販売量（2024 20292029）

表 59.　欧州 国別のセラミックス積層造形材料の販売量（2024-2029、トン）

欧州	2024	2025	2026	2027	2028	2029
ドイツ	99.75	131.06	156.24	192.91	255.45	325.51
フランス	122.59	158.24	187.15	222.00	296.27	370.40
英国	60.01	72.49	85.43	106.61	139.55	179.42
イタリア	27.01	32.73	37.21	46.68	63.98	78.18
ロシア	13.93	16.61	20.87	23.66	31.56	35.50
その他	50.73	74.50	83.69	103.47	129.31	152.03
合計	374.02	485.63	570.59	695.33	916.12	1141.04

出典：二次資料、QYResearch、2023 年

表 60.　欧州 国別のセラミックス積層造形材料の販売量市場シェア（2024-2029）

欧州	2024	2025	2026	2027	2028	2029
ドイツ	26.67%	26.99%	27.38%	27.74%	27.88%	28.53%
フランス	32.78%	32.58%	32.80%	31.93%	32.34%	32.46%
英国	16.04%	14.93%	14.97%	15.33%	15.23%	15.72%
イタリア	7.22%	6.74%	6.52%	6.71%	6.98%	6.85%
ロシア	3.72%	3.42%	3.66%	3.40%	3.44%	3.11%
その他	13.56%	15.34%	14.67%	14.88%	14.11%	13.32%
合計	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%

出典：二次資料、QYResearch、2023 年

6.2.2 欧州 国別のセラミックス積層造形材料の売上（2024 20292029）

表 61.　欧州 国別のセラミックス積層造形材料の売上（2024-2029、百万米ドル）

欧州	2024	2025	2026	2027	2028	2029
ドイツ	9.56	12.30	14.36	18.24	23.87	29.52
フランス	11.30	14.30	16.57	19.66	25.60	31.30
英国	5.47	6.48	7.48	9.62	12.27	15.59
イタリア	2.44	2.90	3.21	4.12	5.60	6.70
ロシア	1.32	1.55	1.91	2.20	2.87	3.16
その他	4.75	6.85	7.58	9.61	11.79	13.50
合計	34.84	44.38	51.11	63.45	82.00	99.77

出典：専門家インタビュー、二次資料、QYResearch、2023 年

表 62.　欧州 国別のセラミックス積層造形材料の売上市場シェア（2024-2029）

欧州	2024	2025	2026	2027	2028	2029
ドイツ	27.44%	27.72%	28.10%	28.75%	29.11%	29.59%
フランス	32.43%	32.22%	32.42%	30.99%	31.22%	31.37%
英国	15.70%	14.60%	14.64%	15.16%	14.96%	15.63%
イタリア	7.00%	6.53%	6.28%	6.49%	6.83%	6.72%
ロシア	3.79%	3.49%	3.74%	3.47%	3.50%	3.17%
その他	13.63%	15.43%	14.83%	15.15%	14.38%	13.53%
合計	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%

出典：専門家インタビュー、二次資料、QYResearch、2023 年

第 7 節： アジア太平洋 国別のセラミックス積層造形材料の市場概要

7.1 アジア太平洋 国別のセラミックス積層造形材料の市場規模

7.1.1 アジア太平洋 国別のセラミックス積層造形材料の売上と CAGRCAGR（2018 vs 2022 vs 2029 2029）

表 63.　アジア太平洋 国別のセラミックス積層造形材料の売上と CAGR（2018 vs 2022 vs 2029、百万米ドル）

アジア太平洋	2018	2022	2029	CAGR（2023-2029）
中国	2.23	6.69	54.85	36.15%
日本	1.69	3.79	21.75	28.37%
インド	0.41	0.91	4.62	24.85%
東南アジア	0.28	0.68	3.25	23.41%
韓国	0.39	0.71	2.80	23.74%
その他	0.23	0.48	2.13	24.94%
合計	5.23	13.26	89.40	31.94%

出典：専門家インタビュー、二次資料、QYResearch、2023 年

7.1.2 アジア太平洋 国別のセラミックス積層造形材料の販売量（2018 20232023）

表 64.　アジア太平洋 国別のセラミックス積層造形材料の販売量（2018-2023、トン）

アジア太平洋	2018	2019	2020	2021	2022	2023
中国	24.55	36.13	39.58	54.19	74.75	99.88
日本	16.84	21.94	25.20	33.10	39.78	51.63
インド	4.66	6.28	7.16	9.85	10.80	14.47
東南アジア	3.19	4.09	4.83	6.20	8.09	11.30
韓国	4.07	4.78	5.22	6.27	7.64	8.58
その他	2.69	3.57	4.08	4.79	5.93	7.13
合計	56.00	76.79	86.07	114.40	146.99	192.99

出典：二次資料、QYResearch、2023 年

表 65.　アジア太平洋 国別のセラミックス積層造形材料の販売量市場シェア（2023）)

アジア太平洋	2018	2019	2020	2021	2022	2023
中国	43.84%	47.05%	45.99%	47.37%	50.85%	51.75%
日本	30.08%	28.57%	29.28%	28.93%	27.06%	26.75%
インド	8.32%	8.18%	8.32%	8.61%	7.35%	7.50%
東南アジア	5.69%	5.33%	5.61%	5.42%	5.50%	5.86%
韓国	7.26%	6.22%	6.06%	5.48%	5.20%	4.45%
その他	4.81%	4.65%	4.74%	4.19%	4.03%	3.69%
合計	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%

出典：二次資料、QYResearch、2023 年

7.1.3 アジア太平洋 国別のセラミックス積層造形材料の売上（2018-2023）

表 66.　アジア太平洋 国別のセラミックス積層造形材料の売上（2018-2023、百万米ドル）

アジア太平洋	2018	2019	2020	2021	2022	2023
中国	2.23	3.32	3.73	5.00	6.69	8.61
日本	1.69	2.16	2.51	3.22	3.79	4.86
インド	0.41	0.55	0.64	0.87	0.91	1.22
東南アジア	0.28	0.35	0.42	0.53	0.68	0.92
韓国	0.39	0.45	0.51	0.59	0.71	0.78
その他	0.23	0.30	0.35	0.40	0.48	0.56
合計	5.23	7.13	8.16	10.61	13.26	16.95

出典：専門家インタビュー、二次資料、QYResearch、2023 年

表 67.　アジア太平洋 国別のセラミックス積層造形材料の売上市場シェア（2018-2023）

アジア太平洋	2018	2019	2020	2021	2022	2023
中国	42.64%	46.56%	45.71%	47.13%	50.45%	50.80%
日本	32.31%	30.29%	30.76%	30.35%	28.58%	28.67%
インド	7.84%	7.71%	7.84%	8.20%	6.86%	7.20%
東南アジア	5.35%	4.91%	5.15%	5.00%	5.13%	5.43%
韓国	7.46%	6.31%	6.25%	5.56%	5.35%	4.60%
その他	4.40%	4.21%	4.29%	3.77%	3.62%	3.30%
合計	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%

出典：専門家インタビュー、二次資料、QYResearch、2023 年

7.2 アジア太平洋 国別のセラミックス積層造形材料の市場規模予測

7.2.1 アジア太平洋 国別のセラミックス積層造形材料の販売量（2024 20292029）

表 68.　アジア太平洋 国別のセラミックス積層造形材料の販売量（2024-2029、トン）

アジア太平洋	2024	2025	2026	2027	2028	2029
中国	130.82	187.73	270.25	355.45	508.28	695.12
日本	71.75	88.71	116.02	157.70	200.60	248.51
インド	18.20	23.52	32.92	40.40	48.60	60.18
東南アジア	13.56	16.81	24.77	28.68	35.18	42.67
韓国	11.38	14.16	18.12	21.06	28.01	33.15
その他	9.54	12.29	18.14	19.93	25.83	29.04
合計	255.25	343.22	480.22	623.22	846.50	1108.67

出典：二次資料、QYResearch、2023 年

表 69.　アジア太平洋 国別のセラミックス積層造形材料の販売量市場シェア（2024-2029）

アジア太平洋	2024	2025	2026	2027	2028	2029
中国	51.25%	54.70%	56.28%	57.03%	60.04%	62.70%
日本	28.11%	25.85%	24.16%	25.30%	23.70%	22.42%
インド	7.13%	6.85%	6.86%	6.48%	5.74%	5.43%
東南アジア	5.31%	4.90%	5.16%	4.60%	4.16%	3.85%
韓国	4.46%	4.13%	3.77%	3.38%	3.31%	2.99%
その他	3.74%	3.58%	3.78%	3.20%	3.05%	2.62%
合計	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%

出典：二次資料、QYResearch、2023 年

7.2.2 アジア太平洋 国別のセラミックス積層造形材料の売上（2024 20292029）

表 70.　アジア太平洋 国別のセラミックス積層造形材料の売上（2024-2029、百万米ドル）

アジア太平洋	2024	2025	2026	2027	2028	2029
中国	11.08	15.62	22.07	29.59	41.48	54.85
日本	6.63	8.04	10.32	14.30	17.86	21.75
インド	1.49	1.89	2.60	3.25	3.83	4.62
東南アジア	1.09	1.32	1.91	2.26	2.71	3.25
韓国	1.01	1.23	1.55	1.83	2.39	2.80
その他	0.74	0.93	1.35	1.51	1.92	2.13
合計	22.04	29.03	39.80	52.74	70.19	89.40

出典：専門家インタビュー、二次資料、QYResearch、2023 年

表 71.　アジア太平洋　国別のセラミックス積層造形材料の売上市場シェア（2024-2029）

アジア太平洋	2024	2025	2026	2027	2028	2029
中国	50.27%	53.81%	55.45%	56.11%	59.10%	61.35%
日本	30.08%	27.70%	25.93%	27.11%	25.45%	24.33%
インド	6.76%	6.51%	6.53%	6.16%	5.46%	5.17%
東南アジア	4.95%	4.55%	4.80%	4.29%	3.86%	3.64%
韓国	4.58%	4.24%	3.89%	3.47%	3.41%	3.13%
その他	3.36%	3.20%	3.39%	2.86%	2.74%	2.38%
合計	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%

出典：専門家インタビュー、二次資料、QYResearch、2023 年

第 8 節： 南米 国別のセラミックス積層造形材料の市場概要

8.1 南米 国別のセラミックス積層造形材料の市場規模

8.1.1 南米 国別のセラミックス積層造形材料の売上と CAGRCAGR（2018 vs 2022 vs 2029 2029）

表 72.　南米 国別のセラミックス積層造形材料の売上と CAGR（2018 vs 2022 vs 2029、百万米ドル）

南米	2018	2022	2029	CAGR（2023-2029）
ブラジル	0.00	0.44	2.07	25.10%
アルゼンチン	0.00	0.08	0.28	20.82%
その他	0.00	0.06	0.20	19.12%
合計	0.00	0.58	2.55	24.04%

出典：専門家インタビュー、二次資料、QYResearch、2023 年

8.1.2 南米 国別のセラミックス積層造形材料の販売量（2018 20232023）

表 73.　南米 国別のセラミックス積層造形材料の販売量（2018-2023、トン）

南米	2018	2019	2020	2021	2022	2023
ブラジル	0.00	2.34	2.63	3.66	4.76	5.99
アルゼンチン	0.00	0.76	0.87	1.00	0.97	1.05
その他	0.00	0.84	0.83	0.79	0.91	1.06
合計	0.00	3.94	4.33	5.45	6.64	8.10

出典：二次資料、QYResearch、2023 年

表 74.　南米 国別のセラミックス積層造形材料の販売量市場シェア（2018-2023）

南米	2018	2019	2020	2021	2022	2023
ブラジル	0.00%	59.35%	60.74%	67.16%	71.69%	73.95%
アルゼンチン	0.00%	19.32%	20.09%	18.35%	14.61%	12.96%
その他	0.00%	21.33%	19.17%	14.50%	13.70%	13.09%
合計	0.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%

出典：二次資料、QYResearch、2023 年

8.1.3 南米 国別のセラミックス積層造形材料の売上（2018 20232023）

表 75.　南米 国別のセラミックス積層造形材料の売上（2018-2023、百万米ドル）

南米	2018	2019	2020	2021	2022	2023
ブラジル	0.00	0.22	0.24	0.34	0.44	0.54
アルゼンチン	0.00	0.07	0.08	0.09	0.08	0.09
その他	0.00	0.06	0.06	0.06	0.06	0.07
合計	0.00	0.35	0.38	0.49	0.58	0.70

出典：専門家インタビュー、二次資料、QYResearch、2023 年

表 76.　南米 国別のセラミックス積層造形材料の売上市場シェア（2018-2023）

南米	2018	2019	2020	2021	2022	2023
ブラジル	0.00%	62.86%	63.16%	69.39%	75.86%	77.14%
アルゼンチン	0.00%	20.00%	21.05%	18.37%	13.79%	12.86%
その他	0.00%	17.14%	15.79%	12.24%	10.34%	10.00%
合計	0.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%

出典：専門家インタビュー、二次資料、QYResearch、2023 年

8.2 南米 国別のセラミックス積層造形材料の市場規模

8.2.1 南米 国別のセラミックス積層造形材料の販売量（2024 20292029）

表 77.　南米 国別のセラミックス積層造形材料の販売量（2024-2029、トン）

南米	2024	2025	2026	2027	2028	2029
ブラジル	7.23	9.35	14.47	18.49	20.20	25.21
アルゼンチン	1.40	2.04	2.30	2.82	3.19	3.71
その他	1.34	1.66	1.95	2.65	2.80	3.12
合計	9.97	13.05	18.72	23.96	26.19	32.04

出典：二次資料、QYResearch，2023 年

表 78.　南米 国別のセラミックス積層造形材料の販売量市場シェア（2024-2029）

南米	2024	2025	2026	2027	2028	2029
メキシコ	72.52%	71.65%	77.30%	77.17%	77.13%	78.68%
ブラジル	14.04%	15.63%	12.29%	11.77%	12.18%	11.58%
その他	13.44%	12.72%	10.42%	11.06%	10.69%	9.74%
合計	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%

出典：二次資料、QYResearch，2023 年

8.2.2 南米 国別のセラミックス積層造形材料の売上（2024 20292029）

表 79.　南米 国別のセラミックス積層造形材料の売上（2024-2029、百万米ドル）

南米	2024	2025	2026	2027	2028	2029
メキシコ	0.64	0.81	1.21	1.58	1.70	2.07
ブラジル	0.11	0.16	0.18	0.22	0.24	0.28
その他	0.09	0.11	0.13	0.18	0.18	0.20
合計	0.84	1.08	1.52	1.98	2.12	2.55

出典：専門家インタビュー、二次資料、QYResearch，2023 年

表 80.　南米 国別のセラミックス積層造形材料の売上市場シェア（2024-2029）

南米	2024	2025	2026	2027	2028	2029
メキシコ	76.19%	75.00%	79.61%	79.80%	80.19%	81.18%
ブラジル	13.10%	14.81%	11.84%	11.11%	11.32%	10.98%
その他	10.71%	10.19%	8.55%	9.09%	8.49%	7.84%
合計	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%

出典：専門家インタビュー、二次資料、QYResearch，2023 年

第 9 節：中東・アフリカ 国別のセラミックス積層造形材料の市場概要

9.1 中東・アフリカ 国別のセラミックス積層造形材料の市場規模

9.1.1 中東・アフリカ 国別のセラミックス積層造形材料の売上と CAGRCAGR（2018 vs 2022 vs 2029）

表 81.　中東・アフリカ 国別のセラミックス積層造形材料の売上と CAGR（2018 vs 2022 vs 2029、百万米ドル）

中東・アフリカ	2018	2022	2029	CAGR（2023-2029）
湾岸諸国	0.00	0.38	1.62	23.35%
南アフリカ	0.00	0.09	0.29	19.42%
その他	0.00	0.04	0.13	17.26%
合計	0.00	0.51	2.04	22.29%

出典：専門家インタビュー、二次資料、QYResearch，2023 年

9.1.2 中東・アフリカ 国別のセラミックス積層造形材料の販売量（2018 20232023）

表 82.　中東・アフリカ 国別のセラミックス積層造形材料の販売量（2018-2023、トン）

中東・アフリカ	2018	2019	2020	2021	2022	2023
湾岸諸国	0.00	2.29	2.55	3.34	4.16	5.29
南アフリカ	0.00	0.77	0.85	0.96	1.14	1.28
その他	0.00	0.39	0.40	0.50	0.58	0.60
合計	0.00	3.45	3.80	4.80	5.88	7.17

出典：二次資料、QYResearch，2023 年

表 83.　中東・アフリカ 国別のセラミックス積層造形材料の販売量市場シェア（2018-2023）

中東・アフリカ	2018	2019	2020	2021	2022	2023
湾岸諸国	0.00%	66.28%	67.11%	69.58%	70.75%	73.78%
南アフリカ	0.00%	22.29%	22.37%	20.00%	19.39%	17.85%
その他	0.00%	11.43%	10.53%	10.42%	9.86%	8.37%
合計	0.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%

出典：二次資料、QYResearch，2023 年

9.1.3 中東・アフリカ 国別のセラミックス積層造形材料の売上（2018 20232023）

表 84.　中東・アフリカ 国別のセラミックス積層造形材料の売上（2018-2023、百万米ドル）

中東・アフリカ	2018	2019	2020	2021	2022	2023
湾岸諸国	0.00	0.21	0.23	0.31	0.38	0.46
南アフリカ	0.00	0.06	0.07	0.07	0.09	0.10
その他	0.00	0.03	0.03	0.04	0.04	0.05
合計	0.00	0.30	0.33	0.42	0.51	0.61

出典：専門家インタビュー、二次資料、QYResearch, 2023 年

表 85.　中東・アフリカ 国別のセラミックス積層造形材料の売上市場シェア（2018-2023）

中東・アフリカ	2018	2019	2020	2021	2022	2023
湾岸諸国	0.00%	70.00%	69.70%	73.81%	74.51%	75.41%
南アフリカ	0.00%	20.00%	21.21%	16.67%	17.65%	16.39%
その他	0.00%	10.00%	9.09%	9.52%	7.84%	8.20%
合計	0.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%

出典：専門家インタビュー、二次資料、QYResearch, 2023 年

9.2 中東・アフリカ 国別のセラミックス積層造形材料の市場規模予測

9.2.1 中東・アフリカ 国別のセラミックス積層造形材料の販売量（2024 20292029）

表 86.　中東・アフリカ 国別のセラミックス積層造形材料の販売量（2024-2029、トン）

中東・アフリカ	2024	2025	2026	2027	2028	2029
湾岸諸国	6.63	7.83	11.50	13.42	17.84	20.00
南アフリカ	1.67	1.61	2.21	2.95	3.29	4.16
その他	0.57	0.72	0.98	1.31	1.60	1.74
合計	8.87	10.16	14.69	17.68	22.73	25.90

出典：二次資料、QYResearch, 2023 年

表 87.　中東・アフリカ 国別のセラミックス積層造形材料の販売量市場シェア（2024-2029）

中東・アフリカ	2024	2025	2026	2027	2028	2029
湾岸諸国	74.75%	77.07%	78.28%	75.90%	78.49%	77.22%
南アフリカ	18.83%	15.85%	15.04%	16.69%	14.47%	16.06%
その他	6.43%	7.09%	6.67%	7.41%	7.04%	6.72%
合計	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%

出典：二次資料、QYResearch, 2023 年

9.2.2 中東・アフリカ 国別のセラミックス積層造形材料の売上（2024 20292029）

表 88.　中東・アフリカ 国別のセラミックス積層造形材料の売上（2024-2029、百万米ドル）

中東・アフリカ	2024	2025	2026	2027	2028	2029
湾岸諸国	0.57	0.67	0.96	1.14	1.48	1.62
南アフリカ	0.13	0.12	0.16	0.21	0.23	0.29
その他	0.04	0.05	0.07	0.10	0.12	0.13
合計	0.74	0.84	1.19	1.45	1.83	2.04

出典：専門家インタビュー、二次資料、QYResearch, 2023 年

表 89.　中東・アフリカ 国別のセラミックス積層造形材料の売上市場シェア（2024-2029）

中東・アフリカ	2024	2025	2026	2027	2028	2029
湾岸諸国	77.03%	79.76%	80.67%	78.62%	80.87%	79.41%
南アフリカ	17.57%	14.29%	13.45%	14.48%	12.57%	14.22%
その他	5.41%	5.95%	5.88%	6.90%	6.56%	6.37%
合計	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%

出典：専門家インタビュー、二次資料、QYResearch, 2023 年

第 10 節： 川上、市場動向の分析

10.1 セラミックス添加物製造材料の主要原材料

10.1.1 主要原材料

主要原材料の市場集中率は「中」である。

原材料	製造拠点	市場集中率
セラミック球/粉末/バインダー	ヨーロッパ、アジア	中

出典：専門家インタビュー、二次資料、QYResearch, 2023 年

10.1.2 原材料の主要サプライヤー

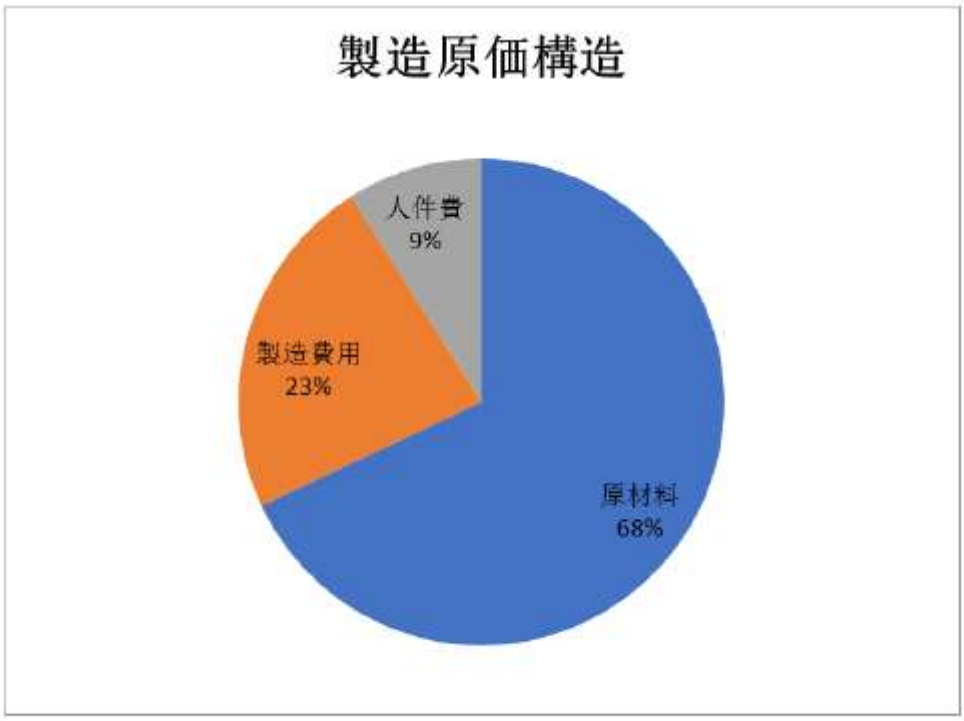
原材料の主要サプライヤーは下記の 4 社。

	会社名	ウェブサイト	所在地
セラミック球/粉末/バインダー	Saint-Gobain	https://www.saint-gobain.com/	フランス
	Solvay	https://www.solvay.com/	ベルギー
	Showa Denko (Resonac)	https://www.resonac.com/	日本
	Sinocera	https://www.create-tide.com/	中国

出典：上記会社、専門家インタビュー、二次資料、QYResearch, 2023 年

10.2 製造原価構造

製造原価のうち約 7 割を原材料が占めている。



出典：専門家インタビュー、二次資料、QYResearch，2023 年

10.2.1 原材料

原材料には、直接材料、付属材料、梱包材などが含まれる。

10.2.2 人件費

これには、賃金や福利厚生などの販売ラインの直接人件費が含まれる。

10.2.3 製造費用

このセクションには、機器、工場、職員寮、倉庫などの減価償却費などの多くの項目が含まれる。また、水と電気、工業用ガスと蒸気などのエネルギーコスト、安全と健康、 低価値の消耗品とスペアパーツ、散発的な材料のコストも含まれる。

11.3 セラミックス積層造形材料の産業チェーン分析

セラミックス積層造形産業チェーンを図で示す。



出典：専門家インタビュー、二次資料、QYResearch，2023 年

10.4 セラミックス積層造形材料の市場動向

10.4.1 セラミックス積層造形材料の市場動向

主要トレンド	詳細
素材の革新	継続的な研究開発は、積層造形用の特性を向上させる新しいセラミック材料に集中している。これには、強度、耐熱性、生体適合性を向上させたセラミックが含まれ、用途の幅を広げている。
カスタマイズとパーソナライズ	ヘルスケアや自動車を含む様々な産業において、カスタマイズやパーソナライゼーションを求める傾向が、セラミックス積層造形市場に影響を与えている。セラミック部品を特定の用途や個々の要件に合わせて調整する能力が、主要な推進力となっている。

10.4.2 セラミックス積層造形材料の市場推進力

D1

拡大するヘルスケア分野での応用：

セラミックス積層造形は、歯科用インプラントや骨補填材など、カスタマイズされた生体適合部品を製造するためのヘルスケア産業に使用される。このような用途の需要は、セラミックス積層造形材料市場の牽引役となっている。

D2

：認知度と採用率の向上

セラミックス積層造形の能力と利点に対する認識が高まるにつれ、この技術を採用する産業が増えている。このような様々な分野にわたる採用の増加は、セラミックス積層造形材料市場の拡大に寄与している。

D3

: 高温環境における高度なアプリケーション：

セラミックスは、その高温耐性やその他の望ましい特性で知られている。セラミックス積層造形は、極端な温度に耐える部品の製造を可能にし、航空宇宙、エネルギー、自動車産業での用途に適している。

推進力	短期(1-2 年)	中期(3-4 年)	長期(5 年)
D1:	中	高	高
D2:	中	中	高
D3:	中	高	高



10.4.3 セラミックス積層造形材料の市場課題

C1

素材の複雑性と多様性：

セラミックスは、様々な特性を持つ多様な材料群である。高温耐性や機械的強度

など、要求される特性を示す積層造形に適した材料を開発することは、困難な場合がある。
C2
素材オプションに制限：
積層造形に適したセラミック材料の範囲は、金属やポリマーに比べて限られている。多様な特性を持つセラミックの幅広いポートフォリオを開発することは、応用分野を拡大する上で極めて重要である。



10.4.4 セラミックス積層造形材料の市場制約要因
R1
: 規制遵守：
規制要件を満たし、セラミックス積層造形材料の認定を取得するには困難が伴う。標準化された試験方法や材料仕様がないため、コンプライアンスへの取り組みが妨げられる可能性がある。
R2
：処理コストが高い
セラミックス積層造形プロセスには、高い処理温度と特殊な装置が伴うことが多い。これらのプロセスに関連する初期投資と運用コストは、特に中小企業にとって、採用の大きな足かせとなる可能性がある。

第 11 節：セラミックス積層造形材料の ASTM および ISO 規格

積層造形に関わる規格は、PSDO 協定に基づき、ISO/TC261 において ASTM F42 と協同で開発が進められており、既に 40 件の規格が発行され、25 件の規格が現在開発中である。その中から、今後セラミックス積層造形に関わる規格作りを進めていくうえで、引用もしくは参照が必要と考えられるものを紹介する。

●ISO/ASTM 52901:2017
一般原理－購入 AM 部品に対する要求事項
本文書は、積層造形によって製造された購入部品に関する要求事項を定義し、規定している。
本文書は、顧客注文情報、部品定義データ、原料要求事項、最終部品特性及び特性、検査要求事項、部品受入方法など、注文時に顧客と部品提供者の間で交換されるべき要素に関するガイドラインを示している。
本文書は、最低受入要件を満たす付加製造によって製造された部品を得るための基礎として使用するために適用される。より厳しい部品要件は、注文時に 1 つ以上の補足要件を追加することで指定できる。

●ISO/ASTM 52910:2018（現在開発中の ISO/ASTM DIS 52910 に置き換えられる予定である。）

設計－要求事項，指針及び推奨事項
本文書は、製品設計に積層造形（AMAM）を使用するための要件、ガイドライン、推奨事項を示している。
本文書は、あらゆるタイプの AM システムで製造されるあらゆるタイプの製品、デバイス、システム、コンポーネント、または部品の設計に適用できる。本文書は、設計プロジェクトにおいて、あるいは AM プロセスの能力を活用するために、どのような設計上の考慮事項を利用できるかを決定するのに役立つ。
一般的なガイダンスと問題点の特定はサポートされるが、具体的な設計上の解決策やプロセス固有または材料固有のデータはサポートされない。
想定しているユーザーは 3 種類：
-AM システムで製造される製品を設計する設計者とその管理者；
-機械設計とコンピュータ支援設計を学ぶ学生たち；
-AM デザインガイドラインやデザインガイドシステムの開発者

●ISO/ASTM 52900:2021
一般原理－基礎と用語
本文書は、積層造形（AM）技術で使用される用語を定義するものである。AM 技術は、積層造形原理を適用し、材料を連続的に加えることによって物理的な 3 次元（3D）形状を造形するものである。
各用語は特定の応用分野に分類されている。

●ISO/ASTM 52920:2023
認定原則－産業用積層造形プロセスおよび生産現場の要求事項
本文書の要件は、積層造形技術を使用する部品製造業者向けのものであり、使用する材料や製造方法とは無関係である。
本文書は、AM 関連プロセスの基準、ならびに付加システム操作に沿った品質関連特性および要因を規定し、付加製造生産現場における活動およびシーケンスを定義する。
本文書は、ISO/ASTM 52900 で定義された積層造形技術に適用され、製造工程における品質保証手段を定義している。
環境、健康、安全の側面は、本文書では包括的に扱っていない。対応する内容は、機器製造者ガイドライン、ISO/ASTM 52931 、ISO 27548 、ISO/ASTM 52933 、ISO/ASTM 52938 1 で扱われている。
本文書は、品質マネジメントシステム（ISO 9001 、ISO/TS 22163 、ISO 19443 、EN 9100 、ISO 13485 、IATF16949 など）が提供する要件に追加する要件を提供する。さらに、本文書は、AM 技術に特化した品質マネジメントシステムに関連する内容を確立するために使用することができる。

●ISO/ASTM CD 52940（開発中）
原材料－バット光重合におけるセラミックスラリーの特性評価

本規格は、光重合法積層造形（AM）プロセスの原料として使用するセラミックスラリーの特性評価について規定する。特性評価には、固形分含有量、動的粘度、粒度分布、化学組成、固体分散安定性などのスラリーの組成および特性が含まれる。この規格はまた、試験用のスラリーサンプルのサンプリングと調製について、利用可能な方法を提供している。本規格は安全性については扱わない。

●ISO/ASTM CD 52957（開発中）
デザインーセラミック材料を使用した部品
この規格は、セラミック材料で作られた部品の使用を希望する製品企画者や設計者を対象としている。セラミック部品およびセラミックの積層造形の特別な可能性について、必要な基礎知識を提供するものである。したがって、これらの分野におけるより深い予備知識は想定していない。

第 12 節：調査結果と結論

1.市場規模
グローバルセラミックス積層造形材料の市場規模は 2023 年の 66.29 百万米ドルから 2029 年には 274.31
百万米ドルに達する見込みで、2023 2029 年の間に 26.7126.71%の CAGR を達成すると予測される。また、セラミックス積層造形材料の販売量は、2023 年の 727.76 トンから 2029 年には 3288.33 トンに達する見込みで、2023 2029 年の間に 28.58% の CAGR を達成すると予測される。

2.コンペティション
世界のセラミックス積層造形材料市場の代表的なプレーヤーには、3D Cream 、ExOne 、AGC セラミックス、Formlabs 、Lithoz 、Prodways 、大平洋ランダム、Tethon 3D などがある。2022 年の売上に関して、上位 5
社は、73.35% の市場シェアを占めている。市場集中率は比較的高い。メーカーはヨーロッパに集中している。

3.地域比較
欧州は一番大きい市場で、2022 年に 41.04% の市場シェアを占めている。それに続いて、北米とアジア太平洋もそれぞれ 33.83% と 23.22% を占めている。

4.製品分類
セラミックス積層造形材料には、主に 粉末、 樹脂、その他が 含まれる。2022 年の販売量に関して、粉末は 78.29% の市場シェアを占めている。

5.川下市場

セラミックス積層造形材料は、主にヘルスケア、航空宇宙・防衛、自動車などで使用されている。2022
年の販売量に関して、航空宇宙・防衛は、50.30% の市場シェアを占めている。

6.価格

セラミックス積層造形材料の価格は、バインダーの種類、品質などに大きな違いがあるため、会社によって異なる。平均価格は原料価格、市場需給、人件費などを考慮し、一般的に毎年多少の変動がある。

（海外調査～出張報告～）

１．韓国出張

１.出張目的	積層造形技術に関する韓国研究所での情報調査及び ISO/TC 261 総会への参加
２.出 張 者	村瀬　晃平（大阪大学）
３.出 張 先 及び面談者	韓国国立材料技術院(KIMS)・セラミック AM 研究室(韓国・昌原市) 面談者：Hui-Suk YUN 教授 ISO TC261(Additive Manufacturing) ASTM F42 合同総会（韓国・インチョン） 面談者：Yavuz Anik 氏 (ISO TC261 マネージャ：独 DIN) Eujin Pei 教授 (TC261/WG4 コンビーナ：ロンドン大学ブリューネル校) David Rosen 教授（ASTM F42.04 コンビーナ：シンガポール工科大学教授) Paul Witherell 博士(米 NIST AM 技術部門) Tai Kyu Lee 博士(ISO TC261-ASTM F42 合同セラミック AMWG コンビーナ：韓国 Nanopac 社代表) Changuang Xu 教授(中国北京理工大学教授) Shin Tae Jin 氏(韓国 Corentec 社 CTO) ほか多数

４.日程表

9 月 17 日(日)：関西空港→韓国プサン国際空港　その後陸路移動 Changwon 市
9 月 18 日(月)：韓国国立材料技術院(KIMS)・YUN 教授訪問しセラミック AM の国際的状況に関する情報収集、その後、ソウル経由しインチョン市へ移動
9 月 19 日(火)～22 日(金)： 韓国インチョン市で開催される、ISO/TC261-ASTM F42 (Additive Manufacturing)合同会議に参加
9 月 23 日(土)：韓国インチョン国際空港→福岡国際空港

５.出張概要

【9 月 18 日(月)】

- 10:00 韓国国立材料技術院(KIMS)着。KIMS は韓国屈指の材料研究の専門研究機関として、研究開発、検査、試験・評価、韓国内企業への技術支援など、材料技術に関する総合的な活動を行っている。
- 面談した Yun 教授は KIMS 先端生体材料研究部長であり、セラミック AM 造形の世界的権威である。韓国 FDA(食品医薬品安全部)の医療機器委員を務めるほか、韓国政府の大統領科学技術諮問委員会の審議委員でもある。
- Yun 教授とセラミック AM のシミュレーション援用についての意見交換した内容は以下のとおりである。

- セラミック AM がほかの金属/樹脂 AM と異なる大きな特徴は，AM 造形原理の基本 7 種、すなわち、「結合剤噴射」「材料噴射」「粉末床溶融」「指向性エネルギー堆積」「シート積層」「光重合硬化」「材料押出し」のすべての方式で造形装置が試作されていることである（実績はこれから用意しないといけない)。金属や樹脂 AM では 7 種すべてで造形することができない。
- 焼結による収縮量は各種 AM 造形方式にのなかでも異なる。たとえば Stereolithography 光重合方式ではレジンが多く必要であるし、SLA や SLM 方式ではバインダが入らないことで収縮量が異なる。
- 粉末材では原料の形・サイズ・材質でも収縮量が変わるだけでなく、XY 方向の収縮率と Z 軸のそれとは(厚さが違うので)大きく違う。それでも均質緻密体や空孔率が各軸で変化しないものはまだ簡単なほうである。骨補填材・人工骨などへの応用を考えるなら、焼結後の形状予測はさらにハードルが上がる。
- AM 造形装置の開発において、金属 AM 開発のノウハウは蓄積されつつあるものの、セラミック AM 用のそれは世界的にも極めて少ない。KIMS では 2006 年からセラミック AM 装置の開発を進めているが、材料だけの開発、金属用システムの改良だけでは不可能で、「セラミックス特化型の装置の開発」が必要である。
- 金属、樹脂製品は基本的に AM でなくても製造できる。これに対し「セラミックス AM でないとできないものを明確にする」&「従来の常識ではセラミックではできないと考えられていたものを実現する」啓蒙活動をしなければ、装置メーカーたろうとする新規企業はどんな業界がどれだけの精度やサイズを求めるのか等を調査しないし、別の用途へ使うことも思いついてくれない。結果韓国国内では AM 装置メーカーになろうとする企業側が使い物にならない試作装置や材料の開発に拘泥してしまい、装置メーカーとして成長しないケースが見られる。
- 装置開発ができない企業の場合、「材料からアプローチしているのでセラミック AM 化できなかった」を言い訳にしてしまう。材料だけで対応できないのなら工程を変える or システムを変える or 酸化物だけでなく近年マーケットニーズの高い非酸化物に方向を向ける、などの工夫が必要だが、韓国ではこれらの戦略を立てない企業が多い。
- セラミックス AM には古典的な製造プロセスを理解していない人が参入しにくい状況である。プリンティング、原料、その他の理由、など原因を切り分けるためにシミュレーション技術を使えるとブレイクスルーになる可能性がある。
- 面談の終了後に KIMS のセラミックス AM 研究室を見学した。こちらでは多種類のセラミックスを組み合わせた Multi-Material 造形を研究しているが、造形の厚み方向に材料を変える従来の Layer-by-Layer 方式でなく、領域ごとに材料を変える結合型 MultiMaterial 造形を行ってい

る。この方式ではセラミック材と他金属材料とのアセンブリ状態での造形が可能である。彼らの言い分ではセラミック AM 装置は目的に合わせて 7 種の造形原理を選択して実現されるものであり造形原理に制約のある他材料の装置とは異なり、包括的な標準化と造形原理に合わせた縦割り的な標準化の二極化が必要ではないかというものであった。

図 1 チタン合金と HA 材の組み合わせ造形サンプル



図 2 KIMS 開発中の多材料セラミック AM 装置内部。上部シリンジに異なる特性のセラミックス材が充填されている。同時に設置できるシリンジの数をさらに増やしたタイプ、歯科用に小型化した AM 装置も開発されていた。



図 3 歯科用クラウンのセラミック AM 造形例。各部の透明度を変化させている。



- 面談終了予定時間を大きく超え 14 時過ぎまで日韓のセラミック AM と医療応用について意見交換した。TC150 日本委員長である菊池委員長とも旧知であり、今後も我が国をはじめとするアジアからのセラミック AM に関する国際標準化に大いに協力していただける様子であった。



図 4 KIMS 面談訪問時、Yun 教授と。

【9 月 19 日(火)】

午前 9 時からインチョン市にある、Songdo Convensia に各国から ISO/TC261 メンバーが集合し、ISO-ASTM 合同会議が開始された。午前中は ASTM の関連に則り、各委員会の参加希望者の人数にあわせて会場内の会議室を割り当て、午後から本格的な会議が始まった。

筆者は AM 造形のデータと造形プロセスルール（デザインと呼ばれる）を審議する TC261/WG4 に参加した。この中で設計時の予定と得られた造形物の形状の違いを評価、あるいは見積もるためのシミュレーション技術の援用について多くの時間が割かれた。

TC261/WG4(Data and Design)では 2023 年に入り、「Simulations」の取り込みを図っているようである。しかしながら「何を」シミュレーションしたいのか、具体的な目標を出すまでには至っていない。筆者のほか FDA から参加した James Coburn 氏がコメントし、AM 装置の造形プロセス挙動をシミュレートするのか、造形出力品の形状精度を事前に予測するためのものなのか、いくつかレベル分けしてみてはどうかと提案した。また形状精度だけでなく、物性や力学強度の事前予測なども重要なシミュレート対象ではないかとコメントした。

会議後コンビーナのロンドン大学 Eujin Pei 博士からコンタクトがあり、近く訪英しセラミックスを対象にした AM や TC150 国内メンバーで検討している模擬骨造形関連の新規検討を含めて我々日本 TC150 メンバーの検討内容を紹介し、TC261 サイドからの協力可能分野やコメントを交換することに合意した。可能なら ASTM 側のコンビーナであるシンガポール工業大学 David Rosen 教授も web での参加意向を表明してくれた。

また引き続き来月渡米し米国 NIMS にて FDA との協議するさいにも、FDA の James Coburn 氏、NIST の Paul Witherell 博士にも参加するよう協力を取り付けた。

図 5 ISO/TC261 総会会場の Songdo Convensia



【9 月 20 日(水)】

午前 9 時から開催された ISO/ASTM JG82 (Ceramics)に参加した。この JG のコンビーナは韓国 TC206 メンバーの Tai Kyu Lee 氏 (tklee@nano-pac.com)が務めている。全体の参加者は 9 名、日本からは村瀬のみが参加した。主な議題は韓国 KICET の Kiln Choi 氏から提案されている CD59252940(Feedstock ceramic material)についてである。内容はジルコニアスラリーの貯蔵管理についてであるが、ISO から 11 件、ASTM からも多数のコメントがあり、図表の修正と normative references の追加を行い draft circulation が行なわれているところである。

もうひとつは ISO-ASTM NP52957 （＝ASTM WK84355）「Additive Manufacturing — Design — Parts using ceramic materials」であるが、ASTM Negative votes have not been resolved になっている。いくつかは Terminology の問題に依るとの報告であったが、ISO/TC206(Fine Ceramics)には米国が参加しておらず、ASTM F42 と ISOTC261 との調整が不調の様子である。



図 6 ISO/TC261-ASTM F42.2 合同 WG (JG82) 参加者集合写真 （左端が筆者）

【9 月 21 日(木)】

- 午前中に韓国の 3D 造形協会(Korean Medical 3D Printing Society)と 3D Fusion Industry Association なるグループにより、AM の医療用インプラントの利用例の報告が行われた。内容は骨欠損のある骨盤への custom-made acetabulum cup と腰椎スクリュー例などの整形外科、歯科領域での症例報告、AI による CT 輪郭判定など研究報告であった。おおむね過去の AM 利用報告であり国際標準に向けた国家的に戦略的な取り組みは行われていなかった。

- そのなかで一件、AM 造形の Limitation に言及した発表があった(Strategic selections and limitations of AM technology in the development of orthopaedic implants)。これは身体各部の整形外科インプラントを肩や股関節、下肢向けなど部位で種類分けし、カスタムメイドインプラントをなんでも AM 造形にするのではなく造形方式を考慮して利用すべきとの内容であった。本件のみ研究のための研究報告でなく、金属 AM 造形の紹介であり造形原理以外も含めて可否を判定するカテゴリ分けについてはまだまだあいまいなところが多かったが、我々が現在検討しているセラミック AM への特化や造形物の多機能について、今後も情報交換可能な印象であった。
- シンポジウム終了後、上記発表者の Corentec 社 Shin Tae Jin 氏と面談した。医療分野の AM 応用では装置の特化（改良）と材料の開発の両方が不可欠であり、氏の会社でもどちらもカスタマイズ化しているとのことであった。TC261 側にはユーザー側の視点が、TC150 側にはハードウェアの特徴理解が進んでいないので、今後の連携を依頼し快諾を得た。



図 7 総会 3 日目に開催されたシンポジウムのタイトル内容

- 正午前から TC261 の運営委員会(CAG: Chairman's Advisory Group、TC150 のコンビーナ会議と同様)が開催され、TC261 のビジネスプラン内容について協議した。CAG には ASTM メンバーは登録されておらず、Web 参加者はなく Face to Face のみの会議である。アジア参加国では筆者のみメンバー登録され

ている。AM に関する近年のトレンド項目を以下とし、

- ✧ Distributed manufacturing
- ✧ Spare parts on demand
- ✧ Digital inventories
- ✧ Sustainability (recycle and reuse)
- ✧ Integration into existing process chains (data and hardware)
- ✧ Generative design

標準化の必要にあるものとして、

- ✧ Applications (spaceflight, aviation, maritime, construction, medical, energy, automotive, robotics, defense)
- ✧ Sustainability (LCA)
- ✧ Data managements (Integration, Analytics, Process specific, Digital products pass, Quality infrastructures)
- ✧ Materials (metal, polymers, composites, ceramics, multi-materials)
- ✧ Testing (NDT, NDE)
- ✧ Part and process qualification and certification
- ✧ AM processes
- ✧ Personal qualification requirements

として個別内容の文章を用意することになった。また、古いマーケット統計データ(Hypo cycle 図)を削除し、もっとフォーマルなレポートにしてはどうかとの意見が出た。発行は 11 月末。

- 午後からは ASTM メンバーも含め、総会時の Resolutions を準備する JAG(Joint Advisory Group)が開催された。こちらもアジア参加国のなかで登録メンバーは村瀬のみである。
  - ➢ ASTM との連携のため TC261 独特に許可されている fast track procedure 投票処理について、ISO-directive に各自留意するよう提案された。TC261 で採択される IS は ASTM とのダブルラベルになるが、CD 投票に関して ASTM は全員賛成までコメント修正が鉄則、ISO は多数決も可能な部分がありネガティブ投票の取り扱いが異なる。
    現在 Aerospace Application で提案されている ASTM F3572-22 等が影響を受けている。
    これはアメリカ(ASTM)が P メンバーに入っていない TC206 に関連したセラミックス AM を提案した場合でも同様な状況が発生する可能性があるので注意が必要である。
  - ➢ 会議の中の議論で「Best practice for In-Situ Flaw Detection and Analysis for Laser-based PBF (ISO/ASTM CD52958)という規格」があることが判った。あいにくこの規格は IS から TR に下げられるらしいが、TC261 側が想定している「シミュレーション応用」の理解になると考えら

れる。

【9 月 22 日(金)】

- 9:00 より TC261 総会が行われた。日本を含め 13 か国の P メンバーが参加した。開催地韓国の KATS, 3DFIA, IAIAC 各機関に謝意を表したあと、TC261 全体の状況および村瀬含めた各コンビーナから各 WG 報告が行われた。
- 村瀬からは TC261 との合同 WG である、TC150/JWG1 の活動状況を報告した。現在投票中の CD 5092「Additive Manufacturing for Medical – General principles –Additive manufacturing of non-active implants」について説明し、AM 関係者から今後も継続した支援を依頼し、総会参加者から全会一致同意を得た。



図 8 ISO/TC150 JWG1 の活動内容を報告中の筆者



図 9 TC261 総会にて、日本からの参加者(TRAFAM)と。

6.今後の見通し・日本の課題

今回の海外調査では、韓国で開催された TC261 総会および KIMS 見学にて AM の医療デバイス応用、とくにセラミック AM に関する動向と国際標準化について調査した。

KIMS ではセラミック AM 開発の状況をヒアリングする中で、成長戦略を主導していく存在を作る重要性が指摘された。すなわち「セラミックス AM でないとできないもの」を明確にすることや、「従来の常識ではセラミックではできないと考えられていたものを実現してみせる」研究者や組織が企業を主導していく必要性を繰り返し強調していた。10 年オーダーの長期的戦略を国や研究機関が念頭に考えるのに対し、直近の 1，2 年しか視界に入らない企業とのギャップに苦慮している様子であった。

TC261 総会では、2012 年ごろの TC 設立初期からメンバー構成割合があまり変化していない。海外参加者のほとんどは PBF 系の AM 装置メーカーまたは金属粉末メーカーに所属しており、セラミック AM など非金属向けの新しい AM 装置も実用化されはじめたのに議題内容が硬直しているように感じた。セラミックス AM は PBF 以外の方式、すなわち BJT(バインダージェット)、DED(指向性エネルギー堆積法), MEX(材料押し出し), MJT(マテリアルジェット), SHL(シート積層)および VPP(液槽光重合法)すべてで造形可能であるのに対し、金属材料向けは PBF 造形方式に偏重した TC261 参加者になるためと考えられる。

わが国の見通し・課題としては、医療分野での標準化議論が無駄に拡散しないよう、国内で医療用途に利用されている、または利用が見込まれる装置がどの造形方式かを含め、長期的・戦略的な次々に標準化をすすめるプランを立てる必要がある。やや議論の停滞が見られる TC261 側の AM 応用のリードをとる機会でもあろうと考える。

2．シドニー出張

1.出張目的	ISO/TC 106に参加し、外科と関係の深い歯科におけるセラミックス、積層造形及び抗菌性試験法に関する標準化設立の状況を把握し、関係者とディスカッションする。
2.出 張 者	菊池　正紀（NIMS）
3.出 張 先 及び面談者	International Convention Center Sydney Gottfried Schmalz（ドイツ University Hospital Regensburg)、河合達志、堀美喜、長瀬喜則（愛知学院大)、武本真治（岩手医大）

4.日程表

9月１４日（木）　羽田空港→
9月１５日（金）　→シドニー空港
9月１５日（金）～9月２０日（水）　ISO/TC 106 会議
9月２０日（水）　シドニー空港→
9月２１日（木）　→羽田空港

５.出張概要

１．９月１５日（金）

夕刻より Welcome Reception に参加し、河合達志、堀美喜、長瀬喜則（愛知学院大)、武本真治（岩手医大）と面会、本会議における戦略を確認した。

２．９月１６日（土）

13:30 開始の TC 106/SC 9/WG 7 Additive manufacturing of dental products に参加した。この会議には、10 の参加国から 42 人の代表者が出席した。

２．１　AWI TS 5105 — Dentistry — Accuracy of CADCAM Additive Manufactured Dental Implants

大岡眞行氏（日本）が、Inter Laboratory Test の提案をした。また本 TS の内容は、液槽光重合法（Vat Photopolymerization、VPP） 技術を使用するポリマー材料に限定すると言うことを提案した。

Florian NEIDHARDT (ドイツ) は、Annex E (Full Denture)に関して発表した。

議論の後、9 つの 参加国 (日本、オーストラリア、ドイツ、アメリカ、イギリス、中国、韓国、カナダ、フランス) が承認したが、1 つの 参加国 (イタリア) が全ての材料を入れるべきだと材料の範囲の変更に反対した。一方、ILT に関しては、すべての参加国が承認した。

また、コメントとそれに対する回答について議論し、ドラフトを修正した。

WG は、Annex A、B、D の ILT が議論とコメントのために 2024 年 1 月 31 日までに開始されることに同意した。 ILT は期限を期限は 2024 年 8 月 1 日とし、Ji-man PARK (韓国) を PL として、8 名の専門家（Florian NEIDHARDT（ドイツ）、Seunghan OH（韓国)、Ji-man PARK（韓国)、大岡眞行（日本)、Thomas ERTL（ドイツ)、Hoon KIM（韓国)、James TSOI（香港)、Liqiang ZHANG） (中国)) は ILT に参加する予定となった。ILT のプロトコルは、ILT の開始日より前に SC 9 委員会マネージャーに提出されます。

３．９月１７日（日）

9:15 から開始の TC 106/SC 9/WG 3 Digitization Devices に参加した。会議には、10 の参加国から 22 人の代表者が出席した。

３．１　ISO AWI 20896-1 (Ed 2) Dentistry — Digital impression devices — Part 1: Methods for assessing accuracy

まず、コンビーナが簡単な議論と最新情報を開催しました。

続いて、ILT PL の Ji-man PARK が、ILT プロトコルの最新情報と概要を説明した。

8 つの機関からの ILT 参加者のコメントとフィードバックが議論された。

Thomas EARL (ドイツ) は、提案された設計改善とテストプロトコルに関して、それぞれの ILT テスト結果とテストオブジェクト (Annex C、D、E、F、G) の推奨事項について議論した。テストモデルを再評価して冗長性を取り除き、設計変更と組み合わせてテストの再現性を向上させる必要があるというコンセンサスが得られた。さらに、メンバーのフィードバックと議論により、テスト オブジェクトを変更し、2

回目の ILT を実施することに WG メンバーが同意した。
その結果、2 回目の ILT プロトコルは、2023 年 12 月 25 日までに SC 9 の委員会マネージャ（CM）に提出される予定。このプロジェクト リーダーは、Ji-man PARK (韓国) が務める。
このプロセスのタイムラインは、CM が ILT プロトコルを受け取った後 11 か月間凍結する。 次回の会議で 2 回目の ILT テストの結果について話し合う予定。

４．９月１８日（月）

13:30 から開始の TC 106/WG 10 Biological Evaluation of Dental Materials に参加し、議長の Gottfried Schmalz 氏と面会した。会議は 9 の参加国から 33 人の代表者が出席した。

４．１　ISO 3990 Dentistry —Evaluation of antibacterial activity of dental restorative materials

歯科修復材料、合着材料、亀裂シーラントおよび歯科矯正用接着/合着材料の抗菌活性の評価が WG 10 会議のコメントを考慮してさらに改訂されたのち、ベルリン 2022 での決議により FDIS として提出され、投票の結果、賛成２０、反対２、棄権１０で受理された。その後、８月６日に IS として発行された。

４．２　ISO/CD 7405 Dentistry — Evaluation of biocompatibility of medical devices used in dentistry

ベルリンでの 2022 年の会議で提出されたコメントおよび Annex E に関するタスクフォースの結果とともに、CD が作成され回覧された。PL が提出されたコメントに対する回答を作成し、N 251 として WG メンバーに配布した。進捗状況を鑑みて、改訂期限の延長が ISO/CS から承認され、。 DIS 提出の新たな目標日は 2024 年 1 月 31 日となった。本会議中、提出されたすべてのコメント都会等について議論され、合意が得られた。

５．９月１９日（火）

５．１　ISO/TC 106/SC2 Prosthodontic Material Plenary meeting

9:00 から開始された ISO/TC 106/SC2 Plenary meeting に参加した。会議は 16 の参加国からの代表 48 名とオブザーバ国からの代表 1 名が出席した。

５．１．１　ISO/FDIS 23401-1 (Ed 1) Dentistry — Chairside denture base relining materials — Part 1

WG がこの文書の改訂を PWI として開始する。

５．１．２　ISO/DIS 14356 (Ed 2) Dentistry — Duplicating material

WG がシドニー会議でのコメントを検討し、修正された文書を FDIS 投票に提出する予定。

５．１．３　ISO 4823:2021 Dentistry — Elastomeric impression and bite registration materials

DIS 段階で第 6 版を作製していく。

５．１．４　ISO/DIS 6872 (Ed 5) Dentistry — Ceramic materials

投票が 2023 年 8 月 8 日に締め切られ、DIS が承認された。 WG がシドニー会議でのコメントを検討し、修正された文書が FDIS 投票に提出される予定。

５．１．５　ISO/CD 10477 (Ed 5) Dentistry — Polymer-based crown and veneering materials

2023 年 8 月 4 日に回覧が終了した。WG がシドニー会議でのコメントを検討し、改訂された文書が DIS 投票に提出される予定。

５．１．６　ISO/NP 3843 (Ed 1) Dentistry — Dental attachments — Measurement of placement and removal forces

WG が 2023 年 8 月のバーチャル会議 (SC8 WG4 と協議) でコメントを検討し、改訂後に CD 配布用に提出される予定。

５．１．７　ISO 22112:2017 ISO 22112:2017 Dentistry — Artificial teeth for dental prostheses

SR の結果収集された意見をもとに規格の見直しをする。

５．１．８　ISO 10139-1:2018 Dentistry — Soft lining materials for removable dentures

– Part 1: Materials for short-term use

SR の結果、規格が確認された。

５．１．９　ISO 7491:2000 Dental materials — Determination of colour stability

SR の結果、規格が確認された。

５．１．１０　ISO PWI 7491 (Ed 3) Dentistry — Determination of colour change of dental materials under ageing and staining development

シドニー会議で議論され、更に検討を進めることになった。

５．１．１１　ISO/TS 19736:2017 Dentistry — Bonding test between polymer teeth and

denture base materials

SR の結果、規格が確認された。

５．１．１２　ISO 28319:2018 Dentistry — Laser welding and filler materials

SR の結果、規格が確認された。

５．１．１３　PWI 22674 (Ed 4) Dentistry — Metallic materials for fixed and removable restorations and appliances

シドニー会議で議論され、更に検討を進めることになった。

５．１．１４　ISO 20795-1 Dentistry — Base polymers — Part 1: Denture base polymers (Ed 3) および 20795-2 Dentistry — Base polymers — Part 2: Orthodontic base polymers (Ed 3)

シドニー会議で議論され、ILT 作業が終了するまで PWI に止め置く。

５．１．１５　コンビーナの再任用

WG 1 – Dental Ceramics (Convenor: Jason Griggs)

WG 12 – Corrosion test methods (Convenor: Spiro Megremis)

WG 23 – Chairside denture base relining materials (Convenor: Hiroshi Murata)

５．１．１６　今後の作業項目

SC1 委員会マネージャーの Amy Michel が、光学特性の試験方法の評価に関して、SC1 WG10 歯科用合着セメント、ベースおよびライナーの会議中に行われた議論の内容を説明した。 本会議の議論の後、このテーマを検討するための PWI を Kwang Mahn Kim 博士を PL として SC 2/WG 6 Colour stability test methods に組み込むことが合意されました。作業は SC1 と調整されることとなり、SC 1 議長の Kazutoyo Yasukawa 氏はこの計画への支持を表明した。

５．２　ISO/TC106/SC9 Dental CAD/CAM systems Plenary meeting

13:00 から開始された ISO/TC 106/SC2 Plenary meeting に参加した。会議は 11 の参加国およびオブザーバ国からの代表 33 名が出席した。

５．２．１　ISO/AWI 18739 (Ed 2) Dentistry – Vocabulary of process chain for CAD/CAM systems と ISO/TR 22710:2019 Dentistry – Vocabulary of process chain from dental CT to CAD/CAM for implant prosthetic restorations – Backward planning in the digital process chain

この両者の Scope を変更せず、また一体化させずに個別の文書として維持することを決定した。ISO/AWI 18739 (Ed 2)については会議中に出たコメント対応をし、コンビーナは CD コンサルテーションに諮るため、2023 年 10 月末までに改訂文書を SC9 の CM に送ることとなった。

５．２．２　WG 3 からの推奨について

本報告書３．項で報告済み。

５．２．３　ISO 18618 (Ed3) Dentistry — Interoperability of CAD/CAM systems

CD コンサルテーションの結果について議論し、それに基づいて修正された草案を DIS 投票にかけるため、2024 年 2 月 29 日までに SC 9 の CM に提出することとなった。

５．２．４　WG 7 からの推奨について

本報告書２．項で報告済み。

５．２．５　WG 5、WG 6 からの推奨について

本会議以前にバーチャル会議で行われたこれら WG の推奨事項が承認決議された。

５．２．６　コンビーナの再任用

WG 3 – Digitizing devices (Convenor: Jacob Park)
WG 4 – Interoperability (Convenor: Seunghan Oh)
WG 5 – Machined devices (Convenor: Kazuo Ohkuma)
WG 6 – Machinable blanks (Convenor: Russell Giordano II)

６．９月２０日（水）

６．１　TC106 Dentistry Plenary meeting

9:00 から開始された ISO/TC 106 Plenary meeting に参加した。会議は 17 の参加国（Australia, Brazil, Canada, China, France, Germany, India, Italy, Japan, Korea (Republic of), Norway, Saudi Arabia, Switzerland, United Kingdom, and United States）および 1 のオブザーバ国（Hong Kong）からの代表 134 名が出席した。なお、前述のものと重複する部分は割愛する。

６．２　SC 6 議長の再任用

Mr. Thomas Wenzel を SC 6 の議長として再任用した（あと 3 年で 9 年の任期になるので、最終任期となる）

６．３　ISO/TC 106/WG 12 Dental implant surgical guide

ISO/DTS 8172 Dentistry – Polymeric materials for dental implant surgical guide を DIS 投票にかける。

６．４　ISO/TC 106/WG 13 Artificial intelligence (AI) based 2D X-ray analysis

バーチャル会議で本会議以前に数回開催された。ISO 18374 のタイトルを “Dentistry — Artificial intelligence (AI) and Augmented Intelligence (AuI) based 2D radiograph analysis — Data generation, data annotation and data processing”に変更することとなった。

６．５　各 SC からの決議報告

６．６　ビジネスプラン

ビジネスプランについて、了承された。ISO/TC 106 規格および関連文書の開発または改訂の際に持続可能性と気候変動を考慮するためのより詳細なガイドラインを作成するために、Mr. Benoit Soucy がコンビーナを務める Ad hoc グループを設立することを決議した。 このアドホック グループには、関係者全員が参加する。

６．７　国際機関との連携の見直し

FDI 担当のゴットフリード・シュマルツ氏から簡単な口頭報告が行われた。詳細は WHO (N1486)、IDM (N1485)、IADR (N1495)、CEN (N1483)、TC 198 (N1482)、TC 150/SC 7 (N1481)、TC 170 (N 1480)、TC 210 (N1484)の各文書を参照のこと。

６．８ 次回会議

米国歯科医師会が、2024 年 10 月 12 日から 16 日まで米国ルイジアナ州ニューオーリンズで 2024 年の会議を主催する。

６．９　その他

６．９．１　インプラントシステムドライバーの標準化

Mr. Floyd Larson が、インプラントシステムドライバーに関する潜在的な標準を求める FDI からの要請を本会議に伝え、利害関係者に本件に関する WG への参加を呼びかけるために配布される書簡の草案が作成された。

６．９．２　ILT 手順

ILT 手順に関する Ad hoc グループのコンビーナである Mr. Brian Darvell が書面による最新情報を提供した (N1474)。このガイダンスはさらに検討する必要が

あるが、TR として公開されるべきであることが同意された。

６．９．３　Digital Object Identifier の Ad hoc グループ

簡単な書面による最新情報が議長の Mr. Brian Darvell によって提供された(N1496)。ISO/TC 106 は、Digital Object Identifier に関する Ad hoc グループを終了する。

６.今後の見通し・日本の課題

TC 106 は TC 150 Implant for surgery や TC261 Additive manufacturing など多くの TC などとリエゾンを組んでいるが、あまり積極的にそれらの TC などと協調した文書を作成する熱意は薄い。そのためにも、TC 150 が情報を積極的に収集し、TC 150 と TC261 の JWG への状況報告ができるようにしておくべきであると考える。幸い、JWG のコンビーナが TC 150 日本委員の阪大村瀬教授であることもあり、筆者あるいは村瀬教授が継続的に TC 106 に出席し、情報収集をすることにより、日本からより優れた IS 案を提案していくことが大事であると考える。例えば、２．１で報告したとおり、TC 106 では AM に関係する標準が医歯学系の中では TC 150 に先行して進められているが、AM 造形の精度の問題から VPP で造形できるポリマーに限定され、セラミックスや金属は対象外になっているが、骨補填材レベルで必要とする精度には達していると思われるので、TC 150 ではセラミックスを対象とした本事業の計画が活きてくるであろう。（なお、セラミックス歯冠の AM について検討している産総研吉原久美子氏の情報は、彼女と研究室の同門であり TC 106 日本委員会のキーパーソンの一人でもある武本真治教授に伝えておいたので、連携が進むと思われる）

３．欧州・米国出張

１.出張目的	AM に関して標準化及び関連研究者に面談し、新規プロジェクトに関して、今後の協力を得るための説明を行い、意見を聴取する。
２.出 張 者	菊池　正紀（NIMS）
３.同 行 者	村瀬　晃平（大阪大学)、鎮西　清行（AIST）
４.出 張 先 及び面談者	ドイツ DIN（Dr. Yavuz Anik）英国 Brunel University London（Prof. Eujin Pei)、University of Cambridge（Prof. Serena Best)、米国 NIST（Dr. Carl Simon Jr, Dr. Paul Witherell）

５.日程表

10 月 22 日（日）　羽田空港→Berlin Brandenburg IAP→Berlin

10 月 23 日（月）　DIN 訪問→Berlin Brandenburg IAP→London Heathrow IAP→London

10 月 24 日（火）　Brunel University London 訪問

10 月 25 日（水）　London→Cambridge→University of Cambridge 訪問→Cambridge→London

10 月 26 日（木）　London→London Heathrow IAP→Washington Dulles

IAP→Rockville
10 月 27 日（金）　NIST 訪問
10 月 28 日（土）　Rockville→Washington Dulles IAP→
10 月 29 日（日）　→羽田空港

6 .出張概要

1. 10 月 23 日（月）



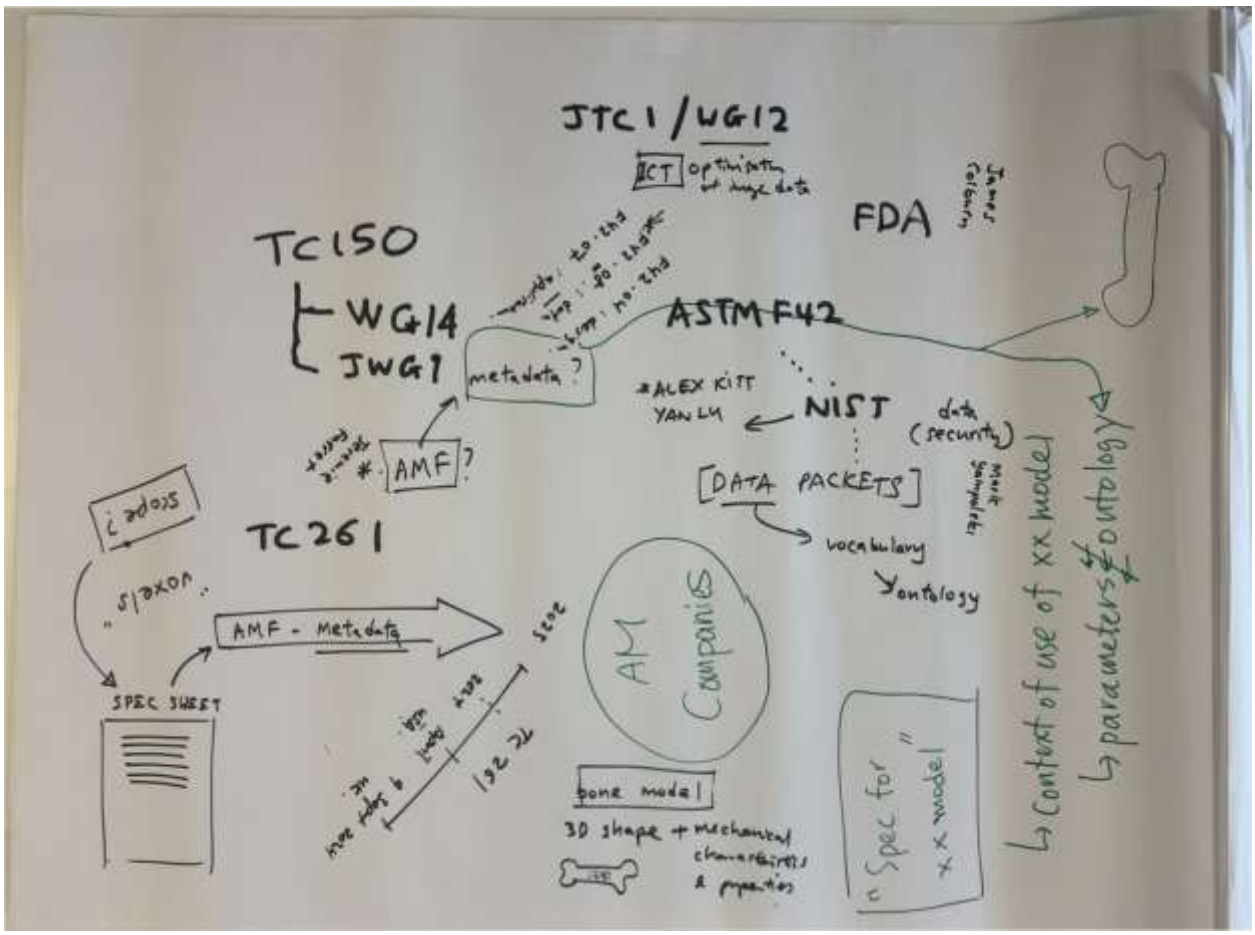
DIN 本部を訪問し、TC 261 Additive Manufacturing の委員会マネージャである Dr. Yavuz Anik と面会した。まずは、村瀬氏が今後提案予定の Personalized AM surgical guide に関する説明をした。Dr. Anik からは、欧州や米国では大きな注意を引いていない問題であり、なぜそれが必要であるかの説明が必要であるとの意見をいただいた。日本側からは、より小さいアジア人の骨では白人と比較して手術の高い精度が要求されると説明した。本プロジェクトのエキスパートのリクルートには Dr. Eujin Pei がサポートしてくれるのではないかと示唆してくれた。
続いて、TC 150/WG 14 で策定された ISO 22926 について鎮西氏から説明し、本 IS をプロモートするキーパーソンについて意見を求めたところ、TC 261/WG 2 の Convenor であり、TC 261 の議長でもある Dr. Marius Lakomiec とコンタクトすることを薦められた。

2. 10 月 24 日（火）

Brunel University London を訪問し、Brunel Design School 及び College of Engineering, Design and Physical Sciences 所属であり、ISO/TC 261 の UK 代表団団長、ISO/TC 261/WG 4 および ISO/TC 261/JWG 67 の Convenor である Dr. Eujin Pei と面会した。TC 150/WG 14 で策定された ISO 22926 について鎮西氏から、Personalized AM surgical guide に関して村瀬氏から説明したところ、添付写真のように各 TC、WG、NIST、FDA などとの関係性と、キーパーソンのダイアグラムを作成して議論することとなった。村瀬氏の案件に関しては、ISO/TC 261 としても DATA PACKETS なども問題になることや、ISO 22926 や ISO/TC 150/WG 14 に関



しても METADATA などが Specification に必要になってくるはずなので、これらの相関図に組み込まれるであろうことなどの意見をいただいた。



3. 10 月 25 日（水）



University of Cambridge を訪問し、Materials Science の Prof. Serena M. Best と面会した。彼女は英国及び欧州での Bioactive Ceramics, Coatings and Composites の大家であり、菊池氏とは長年の友人でもある。今回は、本事業に関わる標準化に関して説明をして、研究者側からの意見を求めるため訪問した。

まずは菊池氏が、最終的には AM による 3 次元造形品に応用することを最終目標に据え、そのシンプルな第一歩としてナノアパタイト結晶を含む細胞-材料複合体（再生骨なども含む）からの核酸抽出標準手法の検討について説明し意見を求めたところ、このような標準手法は研究にも再生医療事業にも大切なことであり、是非進めていくべきであるということ、状況によっては、国際

ILT にも協力してくれることを確認した。
次に、村瀬氏からμCT データから再構築した多孔性セラミックスの強度シミュレーション（最終的には AM 産物の設計などに応用予定）に関して説明したところ、現時点における問題点（CT の精度、現実世界との対応などをどう構築していくかなど）が議論され、さらに国際 ILT やプロトコルの作成に関して協力が可能であるとの言葉をいただいた。また、AM Surgical guide に関して説明したところ、CT の精度と、造形の精度と、測定の精度とそれぞれにポイントがあるという点の議論画行われた。それらを解決するのは少なくとも研究者として重要であるので、整形外科医や学生などにプロジェクトとして協力してもらうことは可能であろうと言う意見をいただいた。
最後に鎮西氏が ISO 22926 について紹介したところ、材料・デバイス開発をしている研究者として興味があり、スペックを知るのに重要な標準であるとの意見をいただいた。

4. 10 月 27 日（金）

NIST を訪問し、ASTM F04.43 Cells & Tissue Engineered Constructs の議長である Dr. Carl Simon Jr、及び ASTM F42/ ISO TC261 のエキスパートである Dr. Paul Witherell と面会した。また、現時点で面会不可能である FDA の Mr. Hany Demian（現 ISO/TC 150 議長）、Mr. John Goode（前 ISO/TC 150 議長）が e-meeting で会議に参加した。
まず、菊池氏が核酸抽出手法について説明したところ、Mr. Demian から「なぜ必要なのか？」という意見が出たものの、Dr. Simon Jr.と菊池氏が説明を行い、必要性を認識した。その際、ILT Protocol にも Scope を入れておいた方が、今後の展開のためにも良いのでは無いかという意見をいただいたが、Dr. Simon Jr.が会議中に Scope の原案を作成、供覧してくれた。おおむね問題ないことを確認し、今後の ILT に Scope を添付することにした。また、ILT に関しても、Dr. Simon Jr.が協力してくれることとなった。
続いて、村瀬氏が多孔質セラミックスの強度シミュレーションについて簡単に説明したところ、強度シミュレーションの意義について十分に検討しないと、標準としては認めにくいという意見をいただいた。今回は敢えて AM 産物への応用はあまりオープンにしなかったが、提案時には充分にその点を検討すべきことが明らかとなった。さらに、AM surgical guide について説明すると、AM ではない物の、Surgical guide に関するガイドラインの文書草案が FDA から発行されたことを教えてもらった。その文書自体には精度の測定方法などは全く記載されておらず、製造業者がどのように測った結果、こういう形状などになったということを記載すべしとのみ書かれているので、精度の測定方法の標準化自体は相補的であると理解した。
鎮西氏が紹介した ISO 22962 については、ASTM F2028-17 の関節窩のルーズニングなど関係する文書があるので、それらとともに使用してもらう標準ではないかという意見があった。

7.今後の見通し・日本の課題

（菊池氏）生体材料・デバイスの AM に関しては、TC 106 Dentistry における光造形プラスチックの精度測定に関するものが最も進んでいると思われるが、TC 106 は（形としては連携しているものの）TC 261 や TC 150 と協調して進んでいるわけでは無く、その点については、TC 150 は王道を進んでいると言える。そのこともあって、今回の訪問では、おおむねポジティブな意見をいただくことになったが、ASTM もあり、日本などと比べて製造・販売業の意見をより反映している米国では、強度シミュレーションに関して（従来通り）一部否定とも採れる意見が出てきた。とは言え、意義を説明していくことで米国も納得してくれる場合が多く、外科領域における AM による三次元構造体に対する標準は米国も含めて早急に策定していきたいと言う意思を感じている。（ただし、時刻に損にならないようなことも考えていることもあり、中々意見がまとまりにくい場合もあるが）

今回のミッションのように、具体的に AM で得られる「何」の「どの部分」に対してフォーカスした提案予定の素案を積極的に示していくことで、AM 造形による外科インプラントの開発を含めた主導権を相手に渡さないようにコントロールしつつ、事業の発展を期待することができるのでは無いかという印象を受けた。一方、このような研究はかならずしも先端的でない面があることから、若手が標準化事業に携わってくれないことが多く、研究機関（大学・研究所）において、予算だけで無く、人材的な面でも不足が目立っていることに不安を感じている。

（村瀬氏）今回の各地訪問では、生体材料・デバイスの AM 造形技術の評価方法、素材に関する力学評価方法に関して我が国提案について説明した。それぞれの提案については、各国から一定の理解を得て、また協力の申し出を受けたことは、我が国が国際標準作成について積極的でありかつ我田引水的な評価提案でないことアピールできた証左であると考える。

評価機関（DIN）、研究機関（ケンブリッジ大、ブリューネル大）および国家認証(FDA)のそれぞれと議論して、「関連する規格が通常連携のない TC のものである場合、とくに AM 等新規技術分野では別分野のエキスパートがほとんどいないこと」「各 TC の専門化が進みすぎ、別分野から規格を調べても理解困難なものが多くみな困っていること」を強く感じた。

各国・各機関とも既存の国際標準を尊重する重要性を認識しているが、膨大な規格のうち似た規格がいくつあるのか把握できていないようである。とくに FDA では業界提案より基本的で適切にもかかわらず、名称や呼称が非常に分かりにくいため見逃している規格がある懸念を強く持っているようであった。われわれはこれまで TC 106(Dentistry)や TC206(Fine Ceramics), TC261(Additive Manufacturing)といった関連 TC とのリエゾンをはじめ、各国内委員会との連携強化・情報収集をすすめてきたが、さらに分野を拡げ、計測などの基盤 TC やデータ処理を扱う IEC/JTC1 等へのヒアリングと連携を進めるべきである。

加えて、これらの提案について我が国の医師の立場からのニーズ汲み上げの必

要性を強く感じられた。とくに FDA では医療機器開発の技術的な問題点と提案の価値については日本提案が効果的であることは充分認めているものの、「これは医師がどんなことをするために必要なのか。この提案内容は本当に求められているのか」の質問が何度もあった。骨補填材や術前練習用の生体模擬材料については、欧米では我が国に比べ、これから要求が増えてくる段階である。国内では、とくに骨補填材などは整形外科領域では過去２０年の間に「どの現場にも準備してあってあたりまえのもの」として医師には認識されているが、欧米ではそうではない。そのため国内では医師により骨補填材を使った手技が多様化しており、専門分野ごとに利用状況が異なるが、医師自身は各自の違いや評価や仕様の有用性に気づかないほど普及している状況である。このため、われわれ標準化にかかわるメンバーが国内外の意識の違いを理解し、適切なコメントを国内医師側に求め、必要性をくみ上げることがより必要であろうと考えられる。

（鎮西氏）AM 規格はそれ自身の強制法規をベースに持たないため、医療機器規制その他とリンクすることで規格の効力を高めることができる。その際に FDA recognized を受けることが最も強力であることからも、FDA（の人）の賛意を得ることが重要となる。ISO 22926 のように医療機器非該当のモデルを対象とするものも同様である。
それには，AM の形状正確性規格、ISO 22926、ISO 19217 のような任意規格は、これを製品規格の中で refer すること、JIS 等の国内規格で normative とすること、あるいは承認ガイドラインや次世代医療機器評価指標等で recommend（実質的に normative）とすることが重要であり、そのような重層的な標準化戦略の中に新規提案を位置付ける「仕込み」が必要である。同時にこれらの規格のユーザーとなる企業向けの広報活動，利用促進の活動が望まれる。

４．ICACC2024 報告



（会場となった Hilton ホテル）

2024 年 1 月 28 日（日）～2 月 2 日（金）に、米国フロリダ州デイトナビーチで開催

された米国セラミックス学会（The American Ceramic Society（ACerS）：以下アメセラ）の第48回先進セラミックスと複合材料に関する国際会議及び展示会（48th International Conference and Exposition on Advanced Ceramics and Composites：以下ICACC 2024）に出席した。

本国際会議は1977年に始まり、コロナ禍（COVID-19）で2年間web会議となっていたが、昨年から対面開催が復活した。長年にわたり世界中のセラミックス研究者、技術者等からの関心の高い国際会議で、最先端技術の発表と情報交換の場を提供している。今回の参加者は37カ国、約830名で、出席者の大半は大学・国研と企業関係者で構成されている。

JFCAは昨年セラミックス3D積層造形研究会を発足したこともあり、非常に注目度の高い当該分野のシンポジウム（SYMPOSIUM 15　第8回積層造形と3Dプリンティング技術に関する国際シンポジウム）において、当協会を代表して竹村標準開発部長が、日本のセラミックス産業と3D積層造形技術の国際標準化状況について講演を行った。以下、出張概要を報告する。

１．日　時：1月28（日）～2月3日（土）、5泊7日
２．出張先：米国フロリダ州デイトナビーチ
　　会場　Hilton Daytona Beach Resort 及び Ocean Center
３．出張者：竹村　博文　JFCA標準開発部長
４．出席者：37ケ国から830名
５．日　程：1月28日（日）羽田発→（ヒューストン経由）→オーランド着
　　ICACC 2024 Welcome Reception
　　1月29日（月）～2月1日（木）ICACC 2024に参加
　　1月30日（火）竹村講演発表
　　1月30日（火）～1月31日（水）展示会、ポスターセッション
　　2月2日（金）オーランド発→（ヒューストン経由）→
　　2月3日（土）羽田着
６．報　告：
６－１　ICACC 2024の概要

フロリダ州デイトナビーチで開催される第48回先進セラミックスと複合材料に関する国際会議および展示会（ICACC 2024）は、1977年の創設以来、アメセラのエンジニアリングセラミックス部門（ECD）が主催している。COVID-19の大流行でICACCは過去2年間web会議であったが、昨年から対面開催が復活した。最先端の研究成果発表と情報交換の場に、37カ国から830名が参加した。出席者の大半は大学・国研と企業関係者で構成されている。

今回のICACC 2024のプログラムは、①19のシンポジウム、②新技術に関する5つのフォーカスセッション及び③若手研究者フォーラムで構成された。また、会議と併設して展示会及びポスターセッション、2日間の短期セミナー、ケネディ宇宙センターツアーが開催された。

19 のシンポジウム及び 5 つのフォーカスセッションのテーマは以下の通りである。
＜19 のシンポジウム＞
SYMPOSIUM 1　セラミックスと複合材料の機械的挙動と性能
SYMPOSIUM 2　構造/環境/機能性用途向け先端セラミックコーティング
SYMPOSIUM 3　第 21 回固体酸化物電池材料科学・技術国際シンポジウム
SYMPOSIUM 4　保護セラミックス-基本的課題と新展開
SYMPOSIUM 5　次世代バイオセラミックスとバイオコンポジット
SYMPOSIUM 6　二次エネルギー貯蔵のための先端材料と技術
SYMPOSIUM 7　第 18 回持続可能なエネルギーハーベスティングのための機能性ナノ材料・薄膜に関する国際シンポジウム
SYMPOSIUM 8　第 18 回構造・多機能材料とシステムのための先進プロセス及び製造技術の国際シンポジウム
SYMPOSIUM 9　多孔質セラミックスの新展開と応用
SYMPOSIUM 10　セラミックスと複合材料のモデリングと設計
SYMPOSIUM 11　生産根幹技術のための先端材料と革新的加工アイデア
SYMPOSIUM 12　ナノ積層遷移金属炭化物・窒化物・ホウ化物、その固溶体および 2 次元対極の設計と応用
SYMPOSIUM 13　核分裂・核融合エネルギーシステム用セラミックス・複合材料の開発と応用
SYMPOSIUM 14　電気・光学・医療用結晶材料
SYMPOSIUM 15　第 8 回積層造形と 3D プリンティング技術に関する国際シンポジウム
SYMPOSIUM 16　ジオポリマー 無機ポリマーとサステイナブル建材
SYMPOSIUM 17　フォトニクスとエネルギーのための先端セラミック材料とプロセス
SYMPOSIUM 18　超高温セラミックス
SYMPOSIUM 19　機能性材料の分子レベル加工と化学工学

＜5 つのフォーカスセッション＞
FOCUSED SESSION 1　バイオインスパイア／グリーンプロセス・先端材料関連技術
FOCUSED SESSION 2　熱電・熱電子エネルギー変換のための先端材料
FOCUSED SESSION 3　化学センサーのためのナノ構造と低次元材料
FOCUSED SESSION 4　セラミック/カーボン強化ポリマー
FOCUSED SESSION 5　先端電気用途向け高電圧材料

＜特別なシンポジウム＞
・プレナリー セッション
・第 13 回グローバル若手研究者フォーラム
・多様性の起業家精神と商業化に関する特別セッション

＜ICACC 展示会及びポスターセッション＞
ICACC 展示会及びポスターセッションは、30 日（火）と 31 日（水）の夕方に隣接する

オーシャンセンターで開催され、参加者がビジネスパートナーとつながり、新しいビジネスの機会を探れるように巧みにプログラムが工夫されている。ここで世界のセラミックスコミュニティーの友人や同僚に会い、交流する機会を得る。

Welcome Reception の様子



プレナリーセッション会場の様子



【日本からの発表者】

ICACC には、日本の大学、企業等から 100 名以上が参加し、次のような機関の代表が各セッション（ポスターセッションを含む）に分かれて発表を行っていた。昨年よりも参加する機関が増えている。（プログラムから検索）

（大学）

北大、東北大、埼玉大、東大、東工大、東京医科歯科大、東京都立大、横浜国大、早稲田大、日大、長岡技科大、新潟大、静岡大、名古屋大、大阪大、京大、京都工芸大、奈良先端大、奈良女子大、岡山大、九大、長崎大

（国研等）

産総研、NIMS、核融合科学研、JFCA

（企業）

IHI、東芝、東ソー、日産、LIXIL、リコー

６－２　プレナリーセッション（1 月 29 日（月）8:30～12:00）

ICACC2024 のプログラム議長である Jie Zhang 氏（中国科学院金属研究所）の開会挨拶及び一連の表彰式の後、4 件のプレナリー講演があった。

４件のプレナリー講演の発表者と題目、要旨は次の通りである。３件目にポーランド

AGH 科学技術大学 Elzbieta Pamula 氏から、骨組織再生に関わる講演があった。

① James L. Mueller Award 受賞　Ghatu Subhash 氏（米国フロリダ大学機械宇宙工学科）
「優れた特性が必ずしも優れた性能をもたらすとは限らない：セラミックスの衝撃挙動を理解するためのメカニズムに基づくアプローチ」
材料科学の基本原則である「より優れた特性は、という材料科学の基本原則は、材料や構造体の材料や構造体の弾性応答を伴う用途では有効である。しかし、このような原則は、高速衝撃時の貫通に耐えるように設計された材料では、通用しない。このような用途では、材料の非弾性および破壊挙動が、より優れた性能を発揮する上で支配的な役割を果たす。この挙動を理解する上でメカニズムに基づくアプローチが重要であることを説明するために、3 つの例を取り上げた。①炭化ホウ素は炭化ケイ素よりも軽量で強度が高いが、軽量保護システムには後者が好まれる。②スピネルは、強度と剛性が低いにもかかわらず、高速衝撃試験においてサファイアを上回る。③最後に、歴史的な例として、米国最古の砦であるセント・オーガスト、セント・マルコス城のセント・オーガスティン（フロリダ州）の米国最古の砦であるカスティージョ・デ・セント・マルコスが、スペインの砦に対する英国軍の大砲攻撃に耐えた歴史的な例を紹介する。1700 年代、スペイン軍の砦に対するイギリス軍の大砲攻撃に耐えた。砦の壁は、「コキーナ」と呼ばれる非常に多孔質の堆積岩で造られていたにもかかわらず、1700 年代のスペイン軍の砦に対するイギリス軍の大砲攻撃に耐えた。

② Bridge Building Award 受賞　島村清史氏（国立研究開発法人物質・材料研究機構 電子・光機能材料研究センター副センター長）
「電気光学用新規単結晶の開発」
電気光学技術の進歩は、幅広い用途に及んでいる、そして今なお更なる発展が求められている。我々の意図は多様な応用のための新しい単結晶材料を探索し産業応用を目指している。β-Ga2O3 単結晶は、新しいワイドギャップ（Eg = 4.8eV）半導体として 2001 年に提案された。2 インチサイズのβ-Ga2O3 単結晶を EFG 技術によって成長させた。2009 年にはショットキーバリアダイオードが実証された。それ以来、産業実装に向けた多大な検討が続けられている。Ce： Y3Al5O12(YAG)単結晶蛍光体プレート(SCPP)を用いた高輝度白色 LED/LD が提案されています。SCPP は、優れた熱安定性、高い発光効率、量子効率の向上を実証した。実装は 2017 年に開始された。Tb3(Sc1-xLux)2Al3O12(TSLAG)単結晶は、高出力レーザー装置用に設計されている。その結果、より高い透明性と大きなファラデー回転を示した。2013 年には量産が開始された。Ce:Li6Y(BO3)3(LYBO)単結晶の光収率が約 600%向上した。Ce:LYBO はポータブル熱中性子検出器用の効率的で低コストかつ安定な固体材料として注目される。携帯型熱中性子検出器用の低コストで安定な固体材料として有望である。

③ Elzbieta Pamula 氏（ポーランド AGH 科学技術大学 生体材料・複合材料学科）
「骨組織再生および治療のための多機能セラミック、ポリマーおよび複合バイオマテ

リアル」
自然治癒しない感染症や重症の骨損傷には、特別な治療や組織工学的アプローチが必要である。このような骨病変の治療をサポートするバイオマテリアルは、次のようなものでなければならない。病原性細菌を死滅させ、次いで骨形成細胞のシグナル伝達と骨組織発現を促進するよう設計されなければならない。我々の研究では、機械的支持を提供し、骨組織と一体化した多機能バイオマテリアルを設計している。チタニアやジルコニア・セラミックス、あるいは生分解性ポリマーで作られた多機能バイオマテリアルを設計しています。治療された病巣からそれらが消失することは、本来の組織の生着と相関している。どちらのタイプの生体材料も、薬物や生物学的活性物質を投与して、骨組織の再生をサポートすることができる。我々は、リン酸カルシウム、コラーゲン、硫酸化ヒアルロン酸をポリマースキャフォールド上に沈着させると細胞の骨形成分化を促進し、骨軟骨欠損の治癒を促進することを発見した。我々はまた感染骨に特化したバイオマテリアルも開発した。これらは注射用マトリックスの成分として使用したり、足場の孔壁に固定化したりすることができる。機械的支持が特に必要な場合には、移植可能な医療器具を得るため、開発された生体材料は、臨床的なニーズに適合するように、薬剤を制御された方法で放出する。

④ Judy Jeevarajan 氏（米国 UL 研究所、電気化学安全研究所）
「リチウムイオンセルとバッテリーの出荷における熱暴走を緩和する材料と設計」
私たちの研究では、さまざまな材料や設計を研究し、熱暴走の伝播を防止する効果を判断している。リチウムイオンセルやモジュールの熱暴走を防止するための有効性を判断するための、様々な材料と設計に関する研究成果を発表する。

６－３　第 13 回グローバル若手研究者フォーラム
THE ECD GLOBAL YOUNG INVESTIGATOR AWARD 受賞　中島佑樹氏（産総研　材料・化学領域　マルチマテリアル研究部門）

昨年、JFCA の FC セミナーでご講演いただいた中島先生が The Global Young Investigator Award を受賞され、今回の the 9th Global Young Investigator Forum の中で講演されました。
「窒化ケイ素セラミックスにおける微細構造-性能相関と AI に基づく物性決定」
本講演では、窒化ケイ素（Si3N4）セラミックスを製造する先進的な方法論について概説する。Si3N4 セラミックスは、一般的に、窒化ケイ素（Si3N4）セラミックスと呼ばれる。Si3N4 セラミックスは、一般に、細長い結晶粒が微細な結晶粒の中に分散した実に複雑な組織から構成されています。優れた機械的、熱的、電気的特性をもたらす。これらのユニークなモルフォロジーのため、Si3N4 は、熱伝導性と機械的強度が向上しており、パワーモジュールの放熱絶縁基板として実用化されることが期待されている。本発表では、まず、この用途に必要とされる Si3N4 基板の特性を熱伝導性、機械的強度、破壊靭性、絶縁破壊強度について、第二に、反応結合 Si3N4 法を戦略的に選択し、その結果得られる性能について、他の従来法と比較しながら述べる。第三に、

Si3N4 の大きな細長い結晶粒が深刻な欠陥として働いている絶縁破壊の詳細について述べた。

島村氏(左)の受賞



中島氏(中央)の受賞



６－４　JFCA 講演発表

1 月 30 日 AM のセッション（S15 8th International Symposium on Additive Manufacturing and 3-D Printing Technologies　SYMPOSIUM 15: Additive Manufacturing Processing, Characterization, and Applications I、第 8 回積層造形と 3D プリンティング技術に関する国際シンポジウム　プロセス、特性及び応用１）の中で、以下のテーマで講演発表を行った。

「日本のファインセラミックス産業における 3D 積層造形技術の推進について」

ファインセラミックス分野の国際標準化の現状と今後の推進活動について講演した。

要旨は以下の通り。

近年産業界においては、付加価値のある多品種少量生産技術として 3D 積層造形が身近になっており、樹脂用の 3D プリンタは個人が各家庭で使用するレベルで世の中に浸透しています。一方、セラミックス用の 3D 積層造形技術はいまだ課題が多く、先行する樹脂、金属と比較するとまだ発展途上の段階です。

日本ファインセラミックス協会（JFCA）は、先進セラミックスの製造において、3 次元プリンタによる 3D 積層造形の製造手法の普及を目的として、研究会を立ち上げました。

この活動の中で、樹脂、金属との類似点、相違点を明確にしつつ、原料粉末、造形手法の開発、及びセラミックスの安定した物性を活かした航空、医療、エネルギー分野等への新たなアプリケーションの発掘を行い、セラミックス業界全体で 3D 積層造形技術を推進したいと考えています。

また、先進セラミックス分野での 3D 積層造形の国際標準化に関しては、ISO/TC261（積層造形）と米国 ASTM F42(積層造形技術)との Joint WG(JG82)が 2021 年に設立されました。ISO/TC206(ファインセラミックス)は 2023 年から ISO/TC261 とリエゾンを結びました。JFCA は、先進セラミックスの 3D 積層造形分野における国際標準化の推進も進めて行きます。



Hirofumi TAKEMURA*, Koji KUROKI
Japan Fine Ceramics Association (JFCA)



同じセッションでNIST（米国標準技術研究所）から2件の発表もあり、非常に多くの聴講者がいた。積層造形の標準化に関心を持つ人が多いことがわかった。

６－５　各シンポジウムの概要

ISO/TC150（外科用インプラント）分野に関係の深い以下２つのシンポジウム（SYMPOSIUM 5　次世代バイオセラミックスとバイオコンポジット、SYMPOSIUM 15 第8回積層造形と3Dプリンティング技術に関する国際シンポジウム）の全講演タイトルと要旨を記載する。また、それ以外のシンポジウムからインプラントに関係のありそうな講演を要旨集から抜粋し、記載する。

なお、講演名・講演者・要旨は原文（英文）をAI翻訳し掲載している。

１）SYMPOSIUM 5　次世代バイオセラミックスとバイオコンポジット

2日間で４つのセッション、14の講演があった。

(ICACC-S5-001-2024) ハイドロゲル浴中におけるリン酸カルシウムのサポートレスセラミック積層造形（招待講演）

H. Yun*1

1.韓国材料科学研究所

積層造形（AM）技術の発展に伴い、体積的な骨組織再生を誘導できる様々なバイオセラミックス足場が活発に開発されている。一方、骨欠損の形状は複雑で、張り出した構造を持つため、常に犠牲となる支持構造の追加製造が必要となる。支持構造のAMは、全体的な工程時間と材料消費量を増加させる。また、犠牲支持体を元の構造から取り外す際に、付加製造されたセラミック構造の破損が生じる可能性もある。この制限を克服するために、我々のグループは、材料押出技術とリン酸カルシウムの加水分解反応を組み合わせることにより、ハイドロゲル浴中での新しいセラミックAMプロセスを提案している。適切な粘性を有するハイドロゲル浴は、リン酸カルシウムインクを浴中に押し出す際に、作製された複雑な張り出し3次元形状を支持構造なしで機械的に支持することができ、加水分解反応を促進して、焼結の代わりに付加製造された3次元構造を固化させることができる。この新しいプロセスにより、全体的な処理時間と材料消費量を削減しながら、張り出し構造を持つ複雑な骨構築物を作製することができる。ハイドロゲル中で作製した足場は、骨形成能が向上した。ゲル浴は細胞に優しい環境を提供するため、リン酸カルシウムと細胞の共印刷も可能である。

(ICACC-S5-002-2024) バイオメディカル応用のための3Dプリント PEEK ベース複合材料の合成と特性評価（招待講演）

A. ソーン 1; S. グプタ*1

1. ノースダコタ大学 機械工学科 （米国
ポリエーテルエーテルケトン（PEEK）は、整形外科用インプラントとして有望な半結晶性プラスチックである。しかし PEEK の問題点は、生物学的に不活性であることと、従来の製造工程ではインプラントの形状の複雑さに限界があることである。これらの問題を克服するために、インプラントには添加物や無機充填剤を入れて、細胞反応や相互作用を高める必要がある。また、インプラントの幾何学的な複雑さを増すために、FDM3D プリンタを使って製造することもできる。私たちが採用したのは、炭素繊維とガラス繊維のフィラーを使用するコースです。この方法を選択した理由は、表面コーティング処理は表面の物理的な付着に依存するため、摩耗、剥離、周辺組織への破片の脱落を引き起こす可能性があり、炭素繊維とガラス繊維を使用した PEEK インプラントの 3D プリントに関する研究が行われていなかったからです。最終的に、本研究は、高性能の PEEK ベースの複合整形外科インプラントを開発するための新しい戦略を提供し、整形外科インプラントの製造時間、複雑さ、製造の容易さを改善する可能性を示した。

(ICACC-S5-003-2024) TPMS ハイドロキシアパタイト足場の開発と特性評価

R.Gabrieli*1; A. Schiavi2; M. Schwentenwein3; E. Vernè1; F. Bainol ;
L. D'Andrea4; P. Vena4
1. トリノ工科大学応用科学技術学部（DISAT）、イタリア
2. 国立計量研究所（INRiM）、イタリア
3. リスツ社（オーストリア
4. イタリア、ミラノ工科大学

骨組織の解剖学的・機能的喪失は、世界で最も衰弱させる問題の一つである。付加的な製造技術や計算手法を応用することで、骨に匹敵する微細構造や力学的挙動を持つ足場が作製でき、組織再生を促進するのに適する可能性がある。本研究では、三周期極小表面（TPMS）を有するハイドロキシアパタイト足場を開発することにより、この課題に取り組むことを目的とする。具体的には、ダイヤモンド、ジャイロイド、IWP 形状の 3 種類の足場を設計し、バット光重合法を用いて作製した。これらの構造は、滑らかな表面、ゼロ平均曲率、大きな表面積を持つ相互連結形状であることから採用された。微細構造および形態学的な調査は、細孔特性に焦点を当てて実施された。音響測定によって得られた固有透過性は、5.8×10-10～1.4×10-9 m2 の範囲と評価され、これはヒトの海綿骨に匹敵する。破砕試験から実験的に求めたヤング率と圧縮強度は、それぞれ 3.1-7.6GPa と 8-36MPa の範囲内であった。全体として、作製された足場は骨修復に有望であり、さらなる研究に値する（例えば、骨細胞の挙動に対する異なる構造の影響など）。

(ICACC-S5-004-2024) ヒドロキシアパタイト、リン酸三カルシウムおよびウォラストナイトをベースとした複合材料の合成とロボキャスティング

R.Gowtham*1; G. Akshay2
1. アラガッパ工科大学、アンナ大学、セラミック技術、インド

2. アンナ大学、セラミック・テクノロジー、インド
タイトルハイドロキシアパタイト、リン酸三カルシウムおよびウォラストナイトをベースとした複合材料の合成とロボキャスト。要旨：組織工学（TE）は臓器再生に取り組む上で極めて重要であり、特に外傷、新生物、加齢の影響を受けやすい骨の再建に重点を置いている。我々は、リン酸三カルシウム（TCP）、ハイドロキシアパタイト（HAp）、ウォラストナイト（WS）など、骨組織工学（BTE）における革新的バイオマテリアルを中心に研究を行っている。HAp 合成は、オレンジの皮やモリンガオレイフェラ（ドラムスティック）の葉などの廃棄バイオマテリアルを再利用し、組織再生用のセラミック粉末を強化する。ダイレクト・インク・ライティング(DIW)は、室温での 3 次元構造作製を可能にする。綿密な熱処理により、焼結構造の完全性を確保し、クラックを最小限に抑えます。その後の評価は、物理化学的特性、表面特性、機械的特性を網羅し、in vitro および in vivo の試験段階を導く。私たちの研究プロジェクト″GREEN PRINT HEALTH ″は、材料科学とヘルスケアの架け橋となり、持続可能性と医療イノベーションに重点を置いています。共同研究は学界、医療機関、産業界にまたがっている。BTE にとどまらず、がん治療と診断におけるハイドロキシアパタイト・ナノ粒子（HAp NP）の研究も行っています。私たちのビジョンは、科学と人類を結びつけ、より環境に優しく、より健康的な未来を形作ることです。

(ICACC-S5-005-2024) 3 次元 in vitro 骨組織モデルのためのバイオミメティック高分子足場（招待講演）
S.ファーレ*1
1.イタリア、ミラノ工科大学化学・材料・化学工学科
力学的、生化学的、構造的な骨微小環境を再現するために、3D in vitro モデルが開発されている。本研究では、骨組織の invitro モデルの足場として、ガス発泡ポリエーテルウレタン（PU）発泡体（PUF）と、異なるパターンで設計された 3D プリント熱可塑性 PU（3DP-PU）を提案する。転移モデルとしての PUF。PUF の気孔率は、海綿骨の骨膜を模倣するのに適していた。骨構造アリザリンレッドと RT-PCR で確認されたように、ヒト脂肪由来幹細胞は PU フォーム上で培養され、骨芽細胞へと分化し、骨由来の腫瘍形成細胞と共培養する骨バイオミメティックな微小環境を提供した。腫瘍凝集体は e-カドヘリン染色と SEM により観察された。CaP 分布の変化は SEM-EDX により同定され、腫瘍細胞の存在と関連していた。腫瘍骨モデルとしての 3DP-PU。3D プリントした足場は、正確で規則的な形状（0-90°、0-45-90-135°、0-60-120°）の孔を有する。気孔率は海綿骨の気孔率の範囲にあることがわかった。圧縮弾性率は、印刷パターンによって 2～4MPa の間で変化した。3DP-PU へのバイオミメティックコーティングは、コーティングされていない足場と比較して、細胞のコロニー形成を促進した。結論として、得られた結果から、骨病態研究に有用な 3D in vitro モデルを作製するために、骨組織を模倣するのに適したさまざまな形状のスキャフォールドを作製することに成功した。

(ICACC-S5-006-2024) 拡散制御によるバイオミネラル-ハイドロゲル複合体の形成と

バイオメディカルへの応用

S.ヤン*1
1.韓国国立教育大学化学教育学部、大韓民国

生体システムは、骨、貝殻、歯のような無機-有機複合体を生成する複雑な戦略を採用しており、それらは身体を保護し支える優れた機械的特性を有している。自然界のアプローチからヒントを得て、主に可溶性高分子と不溶性マトリックスを利用して、生物由来の複合体を再現する方法が数多く開発されてきた。しかし、生体における物質移動は、細胞壁、膜、あるいは細胞外マトリックスを介した受動的拡散と能動的輸送の両方を含み、綿密に制御されているにもかかわらず、イオンの調節された拡散は、これまでそれほど注目されてこなかった。われわれの一連の研究では、生体複合体の合成過程を模倣するために、イオンのゆっくりとした制御された拡散に大きな重点を置いてきた。この拡散制御系では、イオンの供給速度はハイドロゲル中へのイオンの拡散によって制御される。このアプローチは、無機化の調節に役立つだけでなく、有機物と無機物の親密な相互作用を模倣している。バイオミネラリゼーションから知見を得ることにより、バイオミメティックな手法を効果的に用いて、生体活性に酷似し、優れた機械的特性を有するバイオマテリアルを合成することができる。

(ICACC-S5-007-2024) 模擬体液試験におけるアパタイト形成に及ぼす骨修復材料中のクエン酸カルシウム量の影響

Y.Wang*1; 横井太史 2; 島袋雅彦 2; 川下将一 2
1. 東京医科歯科大学大学院医歯学総合研究科（日本
2. 東京医科歯科大学生体材料工学研究所（日本

最近の研究によると、クエン酸カルシウム（CC）は骨修復材料として優れたキャンディデートであることが示唆されている。しかしながら、クエン酸イオンはハイドロキシアパタイト（HAp）の核形成と結晶成長の両方を阻害する。リン酸オクタカルシウム/ゼラチン(OCP/Gel)は生分解性があり、新しい骨と置換可能であることがこれまでの研究で報告されている。CC と OCP/Gel の併用による骨再生促進効果の相乗的な探索が期待されるため、本研究では、模擬体液（SBF）試験において、異なる量の CC と OCP/Gel の併用による HAp 形成を検討した。0.047g と 0.0094g の CC 粉末と CC/ゲル、OCP/ゲル、OCP/CC/ゲル、および厚さ 5mm、直径 5mm、厚さ 5mm、直径 14mm の異なるサイズのゲルを SBF に 7 日間浸した。その試料を X 線回折と走査型電子顕微鏡で評価した。その結果、高用量の C C は HAp の形成を阻害したが、低用量の CC を添加した試料では HAp の形成が観察された。すべての試料の中で、小さなサイズの OCP/CC/ゲル（厚さ 5mm、直径 5mm）が、SBF 試験後に最も高い HAp 形成密度を示した。したがって、低用量の CC は、SBF 試験における HAp 形成の阻害を避けるだけでなく、OCP/Gel と組み合わせることにより HAp 形成の促進を示した。

(ICACC-S5-008-2024) 卵殻およびシリカゲル由来ケイ酸カルシウムの環境調和型調製と構造解析

M.Houria Kaou1、M. Furko1、H. B. Rachid1、K. Balazsi*1、C. Balazsi1

1.エネルギー研究センター（ハンガリー
本研究では、環境に優しいカルシウム-ケイ酸塩バイオセラミックスを安価に調製するための代替材料として、カルシウム源である卵殻とケイ素源であるデシケーターからのシリカゲルの天然廃棄物からなるカルシウム-ケイ酸塩系複合材料の調製について研究した。また、微細構造特性に及ぼすCaO/SiO2比の影響についても研究した。40wt.%のCaOと60wt.%のSiO2の場合、気孔率が最も低く、密度が最も高い2.6g/cm3の擬ラストナイトの形成が観察された。50wt.%のCaOと50wt.%のSiO2の場合、シュードウォラストナイトからウォラストナイトへの相変態が観察された。カルシウム含有量を増加させると、見かけの気孔率が19%増加した。再利用された廃棄物、卵殻、シリカから新しいセラミックスを開発することは、医療やセメント、食品産業への応用が期待されるケイ酸カルシウムを低コストで調製するための最適なソリューションになり得ることが示された。

(ICACC-S5-009-2024) 用途別抗菌・殺ウイルス複合コーティング（招待講演）

C.Balagna*1; A. Luceri1; F. Gattucci1; S. Perero1; M. Ferraris1
1.トリノ工科大学DISAT（イタリア
虫やウイルスに関連した新たな病気の出現や、抗菌薬耐性の問題の増大は、人間の健康に重大なリスクをもたらしている。このような世界的な懸念に対し、研究者たちは革新的な解決策を見出そうと躍起になっている。著者らは、コスパッタリング技術とポリマーセラミック前駆体という2つの異なる方法を用いて、抗微生物／殺ウイルス複合コーティングを開発した。これらのコーティングは、ガラスまたはセラミックマトリックス内に埋め込まれた銀ナノ粒子で構成されており、様々な表面への応用が可能である。銀ナノクラスターは金属イオンの制御された放出を示し、様々な細菌株や真菌の付着と増殖を効果的に抑制する。さらに、このコーティングは、SARS-CoV-2を含むいくつかの空気感染ウイルスに対して強力な殺ウイルス活性を示した。コスパッタリング技術は有望であるだけでなく、工業的に拡張可能で、汎用性があり、環境に優しい。さらに、この技術ではコーティングの組成と厚さを正確に制御できるため、さまざまな用途への適応性が高まる。あるいは、プレセラミック・ポリマー前駆体を使用することで、効果を高めたハイブリッド・コーティングを設計することも検討されている。これらの前駆体は、マトリックスへの銀ナノ粒子の組み込みを容易にし、それによって複合コーティングに特異的な抗微生物特性を付与する。

(ICACC-S5-010-2024) 空気ろ過システム用銀ナノクラスター含有ナノ構造複合コーティングの開発

A.Luceri*1; S. Perero1; M. Donalisio2; R. Francese2; D. Lembo2; M. Ferraris1 ;
C.バラーニャ1
1. トリノ工科大学応用科学技術学部（イタリア
2. トリノ大学臨床生物科学部（イタリア
近年、世界中で深刻な感染症が急速に広がっている：コロナウイルスである。この世

界的な健康危機は、深刻な経済的影響にもつながっており、ウイルスの感染や亜感染症を予防する新たな方法に関する広範な研究が促されている。感染症は飛沫や汚染された表面を介して伝染する可能性があり、また多くの微生物が抗生物質や治療薬に対する耐性を獲得しつつあることから、解決策を見出すことが最重要課題となっており、世界的な関心を集めている。潜在的な解決策のひとつは、様々な機器に抗菌・抗ウイルス複合コーティングを施すことにより、バクテリアやウイルスの増殖を抑制することである。本研究では、エアフィルターに焦点を当て、シリカまたはジルコニアマトリックスと銀ナノクラスターからなるコーティングを、コスパッタリング技術を用いて成膜した。コーティングの予備的な特性評価では、その形態学的および組成的な均一性を評価した。これらのコーティングの有効性を、グラム陽性菌である S. Epidermidis、およびコロナウイルス、インフルエンザ A ウイルス、ライノウイルスに対して試験したところ、抗菌・抗ウイルス活性の点で顕著な結果が得られた。全体として、抗菌・抗ウィルス複合コーティングにおけるこれらの進歩は、感染症の蔓延を防ぎ、世界の健康と安全を向上させる上で重要な役割を果たす可能性がある。

(ICACC-S5-011-2024) 生物活性ガラスの細胞適合性と抗菌性能に及ぼす表面イオンドーピングの影響

M.Lallukka*1; A. Houaoui2; M. Miola1; Z. Najmi3; A. Cochis3; J. Massera2 ;
L.リモンディーニ 3; E. ヴェルネ 1
1. トリノ工科大学応用科学技術学部（イタリア
2. タンペレ大学医療科学技術学部（フィンランド
3. イタリア、ピエモンテ・オリエンターレ大学

整形外科の感染症治療において、骨の成長を促進しながらバイオフィルムを予防することは重要な課題である。銀（Ag）イオンや銅（Cu）イオンをドープした生体活性ガラスは、潜在的な解決策を提供する。しかしながら、ドーパントの毒性については、その存在が細胞毒性リスクをもたらす可能性があるため、対処しなければならない。本研究では、銀イオンおよび銅イオンをドープした生体活性ガラス（Ag-SBA2、Cu-SBA3）の細胞適合性と抗菌性能を評価した。ヒト脂肪幹細胞(hASCs)を、ガラスディスク上、プレインキュベーションの有無、およびフィブロネクチンでコートしたディスク上で直接培養した。さらに、ガラスディスクの黄色ブドウ球菌に対する抗菌活性を評価した。細胞を直接培養すると、最初は細胞の生存率が低下したが、前処理したディスク上で培養すると改善した。フィブロネクチン吸着は Ag-SBA2 の細胞適合性を著しく向上させたが、Cu-SBA3 は最適化が必要であった。抗菌活性に関しては、Cu-SBA3 は、Ag-SBA2 の細胞適合性を低下させた。24 時間後の黄色ブドウ球菌の代謝活性から、その可能性が確認された。しかし、Cu-SBA3 は細胞毒性があるため、さらなる最適化が必要である。Ag-SBA2 は、長期的な細胞適合性と生物活性を維持しながら、初期の感染症に対する治療法として有望である。このプロジェクトは、欧州の Horizon 2020 研究・イノベーションプログラム、マリー・スクロドフスカ・キュリー助成契約番号 860462 の助成を受けている。

(ICACC-S5-012-2024) ハイドロキシアパタイト/コラーゲン骨類似ナノ複合体の表面配向による細胞リクルートメント制御

菊池正紀*1、長谷川智香 2、網塚憲生 2
1. 物質・材料研究機構（NIMS）バイオセラミックスグループ（日本
2. 北海道大学（日本

骨類似のナノ構造と化学組成を有するヒドロキシアパタイト/コラーゲン骨類似ナノコンポジット（HAp/Col）は、骨リモデリングプロセス、すなわち破骨細胞による HAp/Col の吸収とそれに続く骨芽細胞による骨形成に組み込まれる合成材料である。HAp/Col の骨組織反応に関するこれまでの研究は、HAp/Col 繊維の微細構造がランダムな HAp/Col に対して行われてきた。本研究では、HAp/Col 緻密体を厚さ 3.6mm で特別に設計した金型内で一軸プレスにより脱水した。この HAp/Col 緻密体は、ランダムに配向した繊維の層状構造を有していた。したがって、上面に平行な面（p 面）には主に HAp の m 面（いわゆる a 面）と Col 分子の長軸が露出しており、上面に垂直な面（v 面）には HAp/Col 繊維の端面、すなわち HAp の c 面と Col 分子の端面が豊富に存在していた。この厚さ 3.6 mm、直径 2 mm の層状 HAp/Col を Wistar ラットの脛骨の穴に移植したところ、p-表面は骨芽細胞のみのリクルートとそれに続く骨形成を示し、v-表面は破骨細胞のみのリクルートとそれに続く骨吸収を示した。これらの結果は、HAp/Col の配向性が細胞のリクルートを制御していることを示している。

(ICACC-S5-013-2024) キトサン由来ハイドロキシアパタイト中空微小球の薬物充填細胞キャリアとしての応用（招待講演）

陳松 2；尾坂明義*1
1. 岡山大学工学部、日本
2. 太原工業大学生体医工学学院（中国

数百マイクロメートルの微小球は、注射可能な細胞キャリアの開発において大きな注目を集めている。特に、中空空洞を有するミクロスフェアは、薬物送達特性の向上を示した。ここでは、キトサン・ミクロスフェア上にハイドロキシアパタイトを insitu 生体模倣的に析出させ、その後焼成することにより、ハイドロキシアパタイト中空ミクロスフェアを調製した。得られたハイドロキシアパタイト微小球は球状の形態を示し、中空構造であった。これらは良好な生体適合性を示し、骨芽細胞 MC3T3-E1 の支持マトリックスとして機能した。さらに、テトラサイクリン塩酸塩（抗生物質の一種であるモデル薬物）を吸着し、細菌の増殖に対する抗菌性を維持した。

(ICACC-S5-015-2024) 地中バクテリアイメージングのための多孔性透明モデル鉱物

L.クイン*1、K. シャルマ 2、R. ウィップフラー1、S. パラ 1、V. オーファン 1、K. フェイ
バー1
1. カリフォルニア工科大学（米国
2. カリフォルニア大学サンタクルーズ校（米国

ジオバクター・サルファー・レデューサーズ（geobacte rsulfur reducens）のような地中細菌は、メタン酸化や廃水からの重金属除去など、持続可能性研究にとって非常に興味深い複雑な化学変換を行うことができる。これらの細菌は従来、複雑な細孔ネットワークを持つ不透明な堆積物に生息していたため、細菌同士や生息環境との相互作用を研究することは困難であった。そのため、ナフィオン（Nafion™）や天然鉱物のクリオライト（Na3 AlF6 ）のような透明な土壌代替物質で、これらのバクテリアをコロニー形成させることができる。しかし、これらの材料は高価であり、また理想的な透明土壌代替物であれば、孔のサイズや形態などの孔特性を制御することができる。こうした課題に対処するため、この研究では、溶媒、固形分負荷、凍結速度を変えることで細孔の形態を簡単に調整できる、簡便な細孔形成技術である凍結鋳造に着目した。合成的に製造された氷晶石粉末を凍結鋳造・焼結することで、細菌コロニー形成とイメージングに適した生体適合性、透明性、多孔性固体が得られる。この研究では、この技術によってアクセス可能なさまざまな細孔形態と、細孔特性が透明性、透過性、およびバクテリアのコロニー形成に及ぼす影響を調べた。この技術を用いて作製した透明な多孔性氷晶石は、細菌の増殖と空間依存性をその場でリアルタイムにモニタリングすることができる。

２）SYMPOSIUM 15　第 8 回積層造形と 3D プリンティング技術に関する国際シンポジウム

3 日間で 10 のセッションがあり、テーマ分類としては、以下の 5 つである。全部で 47 の講演があった。

① Vat 光重合／ステレオリソグラフィ
② 積層造形プロセス、特性評価、および応用
③ バインダージェットとパウダーベッド融合プロセス
④ 溶融フィラメント製造とダイレクトインクライティング
⑤ ダイレクトライティングとマルチマテリアル

①　Vat 光重合／ステレオリソグラフィ

(ICACC-S15-001-2024) 固体酸化物電解槽(SOECs)用 YSZ セラミックスの積層造形（招待講演）

M.Khakzad1; M. Minary*1
1. テキサス大学ダラス校機械工学科（アフガニスタン

水素は、自動車の動力源から工業的な必要条件を満たすものまで、幅広い用途を持つ万能のエネルギー源として、その認知度が高まっている。課題は、環境に優しく効率的な方法で水素を製造することである。固体酸化物電解セル（SOEC）は、その効率とグリーンエネルギーとの適合性から、重要なソリューションとして際立っている。しかし、SOEC の普及は、高コストや耐久性の限界といった要因によって妨げられている。SOEC の複雑な多層構造は、その高い製造コストの一因となっている。これらのデバイスは、イットリア安定化ジルコニア（YSZ）のような多孔質セラミックと緻密質セラミックの両方を含む様々な材料を使用している。YSZ はイオン伝導性と熱安定性の点

で重要であり、特に SOEC は 750℃前後の高温で作動する。私たちの研究では、光重合技術を用いて YSZ セラミックスを製造するために、積層造形（AM）を利用することに焦点を当てています。これには、コスト削減と耐久性向上の可能性がある。また、付加製造された YSZ の熱衝撃挙動についても議論します。この研究成果は、コスト効率と耐久性を兼ね備えた次世代 SOEC の開発にとって重要である。

（ICACC-S15-002-2024）CeO2 安定化ジルコニア複合材料：デジタル光処理における現在の課題への取り組み

E.Fiume*1; B. Coppola1; B. Inserra1; T. Jean Marc1; L. Montanaro1 ;
P.パルメロ 1
1.トリノ工科大学応用科学技術学部（イタリア

セラミック・ステレオリソグラフィー（CSL）は、バイオメディカル、エネルギー／環境、航空宇宙など、関連する研究分野を横断的に展開する急成長技術である。CSL と先端セラミック材料の組み合わせは、優れた構造的／化学的特性と表面品質を持つ高性能部品の製造につながった。中でも CeO2 安定化ジルコニア（CSZ）は、高い曲げ/圧縮強度と極限環境下での破壊靭性で傑出しており、様々な分野の構造部材として適している。しかし、CSL による CSZ 加工には、CeO2 の紫外域における吸光度と、粒径の微細化戦略の必要性に関連する大きな課題がある。本研究では、市販の CSZ 粉末を基本的な材料として用い、新しい表面改質ルートによって複合粉末を得た後、市販の液体モノマー中に分散させて、印刷可能なセラミックスラリーを得た。粒度分布を制御した微分散粉末を得るために用いたボールミリングプロセスは、スラリーのレオロジー、硬化深さ、ひいてはグリーン／焼成特性に影響を与えた。その結果生じた層間剥離の問題は、印刷の上流でボールミル粉に的を絞った熱処理を施すことで効率的に対処できた。最後に、ジルコニアの変態性、微細構造および機械的特性に対する二次相の影響を調査した。

（ICACC-S15-003-2024）アルミナ強化ジルコニアのバット光重合

M.Schwentenwein*1; J. Sohl1; S. M. Allan2
1. リスツ社（オーストリア
2. リソズ・アメリカ LLC（米国

アルミナ強化ジルコニア（ATZ）は、永久インプラントだけでなく、様々な技術的用途にも非常に有望な候補である。ATZ の利点は、非常に優れた生体適合性、化学的不活性、強度、破壊靭性、硬度、耐摩耗性である。本研究では、いわゆるリソグラフィ・ベース・セラミック製造（LCM）技術を用い、バット光重合（VPP）アプローチによる積層造形（AM）にアルミナ 20wt%の ATZ グレードを使用した。最大肉厚 20mm の緻密で欠陥のない部品を ATZ から作製することが可能であることが実証され、これは VPP 技術による付加製造技術セラミックスとしてはこれまでにないものである。この能力は、歯科用インプラントから、人工股関節やその他の関節、永久医療用インプラント、さまざまな技術部品など、非常に大きな構造物まで、多種多様な設計の製造を可能にする道を開くものである。この寄稿では、AM で作製した ATZ 部品の熱間静水圧プレスの影響も調査した。この先進的な焼結アプローチを用いると、最初の実験では 4

点曲げセットアップで 1100MPa 以上の曲げ強度を達成することができた。

(ICACC-S15-004-2024) リソグラフィに基づくセラミック製造による 3D プリント・セラミックスの損傷耐性の調整

J. C.Sänger*1; A. Hofer2; J. Schlacher1; R. Bermejo3
1. オーストリア、モンタン大学レオーベン校
2. オーストリア、モンタン大学レオーベン校、材料科学
3. オーストリア、モンタン大学レオーベン校構造
・機能研究所

桶重合技術は、あらゆる付加製造技術の中で最高の精度を約束する。セラミックは、機械的応答という点で、モノリシックな対応物を超える設計から恩恵を受けることができる。この研究では、リソグラフィに基づくセラミック製造（LCM）技術、そのマルチマテリアル機能、および 3D プリントと急速焼結を組み合わせた 3 つの異なるコンセプトの可能性を探った。アルミナおよびアルミナ-ジルコニア材料の多層設計は、2K-(LCM)技術を用いて製造され、1GPa の二軸強度に達することができる。これは、3D プリントされたバルクアルミナの 650MPa と比較して、焼結からの冷却時の残留応力と関連している。このコンセプトは、3 次元設計への応用に成功した。高アスペクト比テンプレートの整列と Templated Grain Growth 法を組み合わせたテクスチャー・アルミナ微細構造により、670 MPa の二軸強度を達成。等軸アルミナで測定された 570MPa と比較すると、積層造形とテクスチャーアルミナの組み合わせは、優れた機械的強度を持つアルミナ部品を製造する動機付けとなった。急速焼結では、非常に精密な結晶粒組成を設計することができるが、圧力支援急速焼結では単純な形状に限られていた。減圧スパークプラズマ焼結（PL-SPS）は、積層造形と急速焼結で達成される有利な特性の組み合わせを可能にする。

(ICACC-S15-005-2024) セラミックステレオリソグラフィによる機能的および構造的用途のための複雑なコンポーネントの作製（招待講演）

F.Spirrett*1; A. Oi1; S. Kirihara1
1. 大阪大学接合科学研究所（日本

セラミック・ステレオリソグラフィは、様々な用途のための複雑な形状の作製に利用できる。流体輸送、熱伝導、環境制御などの応用のために、自己相似フラクタル形状の設計と計算解析を行った。ヒルベルト曲線構造は、セラミックステレオリソグラフィー法により、ガラスとセラミックの複合ペーストから作製することに成功し、自己充填形状を持つ緻密な焼結セラミック部品を作製した。幾何学的自由度のさらなる探求は、テラヘルツ波制御を可能にするためにチタニアマイクロフォトニック結晶は、ステレオリソグラフィーのレーザー加工パラメータと加工後の熱処理を最適化することで、高い相対密度で作製された。チタニアマイクロフォトニック結晶は、ステレオリソグラフィーのレーザー加工パラメータと加工後の熱処理を最適化することにより、高い相対密度で作製された。フォトニックバンドギャップの測定値と計算値は良い一致を示し、完全なフォトニックバンドギャップは 0.26～0.5μm であった。

0.44THz が焼結チタニア格子に開いた。

(ICACC-S15-006-2024) 応力マッピングと化学的特性評価による 3D プリント 94wt%脱脂アルミナの熱ポスト処理の影響の追跡

S.G. Gomez*1; D. Cillessen2; J. Duay2; K. Sadzewicz2; E. MacDonald1
1. テキサス大学エルパソ校 航空宇宙・機械工学（米国
2. サンディア国立研究所（米国

セラミックのバット光重合（VPP）は、多くの用途における新しい製造方法の分野で高く評価されている。リソグラフィ・セラミック製造（LCM）は VPP 技術の一種であり、感光性セラミック懸濁液にミクロン・サイズの正方形の光を投影するピクセルを利用することで、高解像度を可能にする。印刷パラメータの最適化により、高い寸法精度のグリーンボディを実現することができる。本研究では、脱脂された 94%アルミナと高純度（99.8%）アルミナの両方について、熱環境にさらされた場合の寸法性能への影響を実証した。また、フーリエ変換赤外分光法（FTIR）、蛍光 X 線法（XRF）、ラマン分光法を用いて、さまざまな熱段階における 3D プリント部品の化学組成と応力を追跡しました。SNL は、DOENNSA 契約 DE-NA0003525 の下、NTESS によって管理・運営されています。

(ICACC-S15-007-2024) リソグラフィーに基づくセラミック製造(LCM)で製造された脱脂 94%アルミナの寸法性能

D.Cillessen*1; S. G. Gomez2; E. MacDonald2
1. サンディア国立研究所（米国
2. テキサス大学エルパソ校 航空宇宙・機械工学（米国

サンディア国立研究所では、リソグラフィーに基づくセラミック製造（LCM）を実現する技術により、開発期間を短縮し、多くの開発用途に適した材料特性を持つコンポーネントを提供しています。LCM 技術は、450nm の投影光で感光性樹脂を層ごとに硬化させるデジタル光プロセス（DLP）を利用しています。投影光を用いたリソグラフィ・プロセスは、高解像度で寸法精度の高いグリーンボディ・セラミックを作成できることで知られている。印刷パラメーターの操作を通じて、製造プロセスの各段階における寸法性能への影響を研究する。この研究のために選択した材料は、光硬化性樹脂に組み込んだ SNL 開発の脱脂 94%アルミナです。この材料の寸法性能を、以前に開発された SNL 脱脂 94%アルミナおよび高純度（99.8%）アルミナと比較した。その結果、輪郭オフセット-20im、露光エネルギー184mJ/cm2 が、設計されたコンポーネントの最高精度を達成することが判明した。SNL は、DOENNSA 契約 DE-NA0003525 のもと、NTESS によって管理・運営されています。

(ICACC-S15-008-2024) β-炭化ケイ素ナノパウダー強化によるポリマー由来 SiOC セラミックスのピエゾ抵抗率の向上

M. ラーマン*1; S. キム 1
1. カナダ、カルガリー大学機械・製造工学部

3D プリンティング技術は、セラミック材料の製造に新たな可能性をもたらしました。3D プリンティングを用いて液体感光性樹脂から作製されたセラミックスは、加工の複雑さを軽減しながら、高精度で幾何学的な柔軟性を提供します。我々は、マスク立体造形（MSLA）技術に基づく低コストの 3D プリンタを利用して、高ピエゾ抵抗 SiOC-SiC ポリマー由来セラミックマトリクス複合体（PDCMC）の作製に成功した。ポリマー由来の SiOC セラミックスは、1400℃以上で熱分解するとピエゾ抵抗特性を示したが、これはアモルファスマトリックス内に遊離炭素が形成されたことに起因する。しかし、ピエゾ抵抗特性を示したにもかかわらず、高い熱分解温度は収縮率、密度、機械的特性に悪影響を及ぼし、3D プリント SiOC の表面クラックと気孔率の増大を招いた。アモルファス SiOC マトリックスにβ-SiC を導入することで、より低い熱分解温度（1100℃）でピエゾ抵抗特性が著しく向上した。より低い熱分解温度で新たに作製した PDCMC は、それぞれ 60 GPa と 11.3GPa のヤング率と硬度を示した。この 3D プリント複合セラミック材料は、常温で約 8987 のゲージファクターを示し、これまでに報告されている値を上回った。

(ICACC-S15-009-2024) セラミックスの光ベース容積添加製造のための粉末特性の調整

J.Guenster*1; J. C. Sänger2; B. Pauw1
1. ドイツ連邦材料試験研究所（BAM
2. オーストリア、モンタン大学レオーベン校

セラミック粉末成形体やセラミック懸濁液（スラリー）をその体積内で光で操作するには、材料のトランスペアレンシーを最小限に抑える必要があります。ポリマーや金属に比べ、セラミック材料は電子バンドギャップが広いため、光学的な透明窓が広いという特徴があります。光学窓は通常、波長 0.3μm 以下から 5μm までの範囲である。したがって、セラミック粉末化合物の体積に光を透過させるためには、その光散乱特性を調べ、調整する必要がある。本研究では、セラミックスラリーの体積内にフィリグリー構造を付加製造するために、二光子重合（2PP）やその他の体積法を適用するための物理的背景と材料開発戦略を紹介する。

(ICACC-S15-010-2024) 効率的エネルギー貯蔵のための固体電解質の積層造形法

S.桐原*1；F.スピレット 1
1.大阪大学接合科学研究所（日本

積層造形法（STL-AM）では、ナノ粒子を含む樹脂ペーストを塗布し、UV レーザー描画による光重合で 2 次元断面を作製し、レイヤー積層で 3 次元モデルを立体印刷した。このリソグラフィシステムは、機能的な形状を持つ嵩高いセラミック部品を得るために開発された。3D プリンティングの主材料として、ナノメートルサイズの金属粒子とセラミック粒子を、体積分率で約 60%のアクリル液体樹脂に分散させた。これらの材料を混合し、変形させてチキソトロピー性のスラリーを得た。この樹脂ペーストを、機械的に移動させたナイフエッジによって、層厚 50μm でガラス基板上に塗布した。波長 355nm の紫外線レーザービームを可変直径 50μm に調整し、展延された樹脂表面

を走査した。照射パワーは、層結合のために適切な凝固深さに自動的に変更された。ナノ粒子を含む複合材料前駆体を脱脂し、大気雰囲気中で焼結した。コンピュータ支援によるスマート製造・設計・評価（Smart MADE）を通じて、持続可能な開発目標（SDGs）に積極的に貢献するエネルギー貯蔵用リチウム化合物のセラミック部品が製造された。

(ICACC-S15-011-2024) 透明粉末を原料とする 2PP プリントテクニカルセラミックス

J.C. Sänger*2; B. Riechers1; B. Pauw1; J. Guenster1
1. ドイツ連邦材料試験研究所（BAM
2. オーストリア、モンタン大学レオーベン校

二光子重合(2PP)は最高の精度を約束し、その解像度をテクニカル・セラミックスに利用することで、新しいクラスの材料が生まれる。しかし、粉末プロセス用のセラミックスラリーにはセラミック粒子が必要であり、これは原料に不透明性をもたらす。これは、光ベースのバット重合技術、特に 2PP とは相反するものである。平均粒径 5nm のセラミック懸濁液からナノ粒子を選択することで、粒子部位での散乱が十分に低減され、セラミック粒子分率が 80wt%までの 2PP に適した混合物を作ることができる。これにより、これまでのセラミック AM では最小の 500nm の分解能を持つイットリア安定化ジルコニア（YSZ）部品の製造が可能になった。ナノ粒子は、その高い焼結活性により、焼結レジームを変化させることができ、ジルコニア・セラミックの標準温度である 1450℃と比較して、800℃の焼結温度ですでに安定したセラミック・アーキテクチャを作成することができる。焼結温度を変化させることで、典型的でない粒子径と粒界が得られます。2PP の高分解能と相まって、モノリシック・ジルコニアとは異なる機械的特性を持つ構造が生み出される。2PP 構造は、焼結温度、選択された形状、構築分解能に応じて、低い密度でも高い機械的強度を示し、室温で微小塑性都市を形成する。セラミックメタマテリアルが形成される。

② <u>積層造形プロセス、特性評価、および応用</u>

(ICACC-S15-012-2024) 高純度アルミナの曲げ強度に関するパイロットラウンドロビンのフラクトグラフィ観察（招待講演）

G. D. クイン*1; R. マイアー2
1. 米国国立標準技術研究所材料計測科学部
2. アメリカ国立標準技術研究所

付加製造された高純度酸化アルミニウム曲げバーの曲げ強度に関する試験的なラウンドロビンを実施した。6 つの国際的な研究所が、リタロズ 350 セラミックスラリーとリタロズ Cerafab 印刷システムのいくつかのモデルを使用して曲げバーを作りました。ベンドバーは水平方向と垂直方向の両方で製造されました。ASTM 規格 C 1161、4 点荷重、コンフィギュレーション B に従って、参加した研究所から 150 本以上の焼成後の棒材が NIST で破壊されました。驚くほど多様な新しい興味深いタイプの欠陥が同定され、ワイブル強度分布図と関連づけられた。この研究は、ASTM 委員会 F42、セラミックに関する小委員会 F42.05.05 と共同で NIST がコーディネートしました。



(ICACC-S15-013-2024) セラミックスの低温緻密化のための新しい焼結技術

R.マイヤー*1
1.米国国立標準技術研究所

NISTの材料計測研究所（MML）（材料計測科学の向上を目的とした計測研究所）には、積層造形（AM）の重点分野プロジェクトがあり、セラミックAMの基準測定、ツール、手順の開発を目標としています。セラミック3Dプリンティングの大量商業化へのハードルは、プリント部品の焼結に必要な専門知識です。冷間焼結（従来の処理温度の数分の一でセラミックを完全な密度まで焼結する）における最近の進歩は、セラミックAMをより使いやすく炭素を削減する後処理工程と統合する方法として検討されています。NISTでは、その場試験装置を製作し、最近では放射光ビームラインで冷間焼結材料の測定を実施しています。ZnOの冷間焼結に関するその場X線散乱実験とその場X線トモグラフィ実験の最近の結果について発表する。これらの実験は、酸化物／バインダー系の処理中に起こる過渡的な相変化のその場測定を開発する上で重要な洞察を提供し、現在進行中のNISTセラミックAM研究の計画という観点から議論する。

(ICACC-S15-014-2024) 日本の先端セラミックス産業における3D積層造形技術の推進

H.竹村*1; 黒木啓司 1
1. 日本ファインセラミックス協会

近年、3D積層造形は付加価値の高い製品を多品種少量生産するための身近な技術となっており、樹脂用の3Dプリンタも急速に世の中に浸透している。個人家庭で使用するレベルである。一方、セラミックスの3D積層造形技術は、先行する樹脂技術や金属技術に比べ、まだまだ課題が多く、発展途上の段階にある。日本ファインセラミックス協会（JFCA）では、3Dプリンタによる先端セラミックス製造の普及を目指し、研究会を発足させました。この活動を通じて、樹脂や金属との共通点や相違点を明らかにするとともに、原料粉末や造形手法の開発を進め、セラミックスの安定した物性を活かした航空・宇宙、医療、エネルギーなどの分野での新たな用途を見出すことで、3D積層造形技術をセラミックス業界全体に普及させたい考えだ。2021年、ISO/TC261(積層造形)とASTM F42(積層造形技術)は、アドバンストセラミックス分野における3次元積層造形の国際標準化に関して、ジョイントWG(JG82)を設立した。また、JFCAはアドバンストセラミックスの3次元積層造形分野の国際標準化を推進する。

(ICACC-S15-015-2024) 多孔質・高密度コンポーネントの積層造形のためのゾル-ゲルプロセス

G. Franchin*1; A. Zanini1; P. Colombo1
1.イタリア、パドバ大学産業工学部

液体原料を用いた積層造形は、セラミック部品を容易に製造できる可能性を示している。実際、セラミック材料は材料の押し出しに適したレオロジーを有しており、また、槽内光重合やさらには容積 AM アプローチに光硬化性機能を付加するためのいくつかの物理的および化学的アプローチが存在する。液体前駆体の使用は、製造と焼結の両方に役立つ。ゾル-ゲル合成により、組成や微細構造開発の面で高い汎用性を得ることができ、制御された（非確率的な）階層的構造を持つ構造体の製造が可能になる。高密度の多成分ガラス構造および核物理学応用のためのナノアーキテクト炭化物ターゲットの例を概念実証として紹介する。

(ICACC-S15-016-2024) アディティブ・マニュファクチャリング – 多用途だが困難なプロセス（招待講演）

D.B. Kata*1; P. Rutkowski1; J. Lis1
1. AGH 科学技術大学材料科学・セラミックス学部（ポーランド

三次元（3D）プリンティングとも呼ばれる積層造形（AM）は、絶えず急速に拡大している。構造的および機能的な用途で、3D プリンティングはあらゆる産業用途で広く使用されている。比較的低コストで汎用性があり、原材料のロスを削減できる可能性があるため、特にセラミックや金属ベースの材料では、環境に優しい製造方法として認識され始めている。AM の応用可能性は、2 つのシステムの適切な評価によって示されている、(1)AlN-グラフェンナノコンポジット、(2)インコネル 625-WC コンポジット。異方性 AlN-グラフェンナノコンポジットを AM 技術で成形した。積層造形が熱異方性と微細構造の外観に大きく影響することが示された。グラフェンの含有量と AM 条件によって異方性を制御できる可能性が示された。熱伝導率の例に基づき、窒化アルミニウムの適用可能性に関する重要なパラメータを示した。化学的および構造的に均質なインコネル 625-WC 複合皮膜を積層造形法により作製した。このようにして、新しいクラスのコーティングが高出力タービンブレードに実装され、その効率が改善された。高品質の金属-セラミック複合材料を作製するための AM 技術の新しい例をいくつか示す。

(ICACC-S15-017-2024) SLA 3D プリンティングによる高透明・半透明多結晶セラミックス

R.Svintsitski*1、R.Gaignon1、A.Roux1、M.Bourjol1、E.Louradour1
1.フランス、3DCERAM SINTO

アルミナ、スピネル、ジルコニアの透明/半透明セラミックスは、光学的、機械的、高融点、高化学的不活性といった特殊な特性により、多くの産業分野で魅力的な材料となっています。これらの特性は、レーザー、蒸気ランプ、歯列矯正用ブラケット、装

甲窓、高性能レンズ、触媒...など、多くの応用分野での関心に応えています。複雑な形状の製品への需要の高まりと、現在の透明材料への要求が相まって、3D プリンティングセラミックは、このニーズに応える理想的な技術となっており、新しい標準的な成形プロセスとして産業への展開を確実なものにしています。その結果、3DCeram は、透明セラミック製造のための 3D プリンティング・プロセスの認定と工業化について、定期的に勧誘を受けている。本プレゼンテーションでは、産業上の要請から得られた 2 つの材料（アルミナとスピネル）の研究を紹介する。原料の特性、成形方法、適用されるさまざまな熱処理、および得られた最良の結果について説明する。

(ICACC-S15-018-2024) 複雑な Al 023 熱交換器のステレオリソグラフィ 3D プリント

C.ウェザーストーン*1、T.ショルダーズ 1、M.カウフ 1、R.マングリック 2
1. 技術評価・移転（米国
2. シンシナティ大学 機械・材料工学（米国

Al203 の高性能熱交換器が積層造形法によって製作された。熱水力学的性能を向上させるため、オフセットストリップフィン、波状フィン、コルゲートフィンなどの特徴を強化した熱交換器の設計が、卓越した熱伝達と低流動摩擦ペナルティを目標に行われた。これらの高度な熱交換器設計のために、追加的な製造プロトコルが最適化された（アルミナ樹脂のレオロジー、ビルドパラメーター、洗浄手順、バインダーのバーンアウト、焼結）。これらの設計と工程の変更により、22～26%の収縮にもかかわらず、最終製品は 0.002 インチの公差を満たすことができる。その結果、壁面間の隙間は 0.5mm と小さくなった。高度なフィン設計を持つ 3D プリント Al203 熱交換器の性能は、シンシナティ大学のユニークなセットアップで測定された。単純な一方向流熱交換器は、その後、気体対気体および液体対気体設計のクロスフロー形状を追加することにより、さらなる性能向上のために改良された。上記の設計のセラミック熱交換器を評価し、モデリングによる予測や同じ設計の金属熱交換器と比較した。その結果、材料間で一貫した性能マーカーが示され、温度／環境安定性の向上とセラミックの微細形状の可能性から、3D プリントセラミックがわずかに有利であった。

(ICACC-S15-019-2024) CerAM 技術による炭化ケイ素および炭化ホウ素の積層造形とレーザーウォータージェット切断の可能性

J.Abel*1、B. Matthey2、C. Berger1、U. Scheithauer3、T. Moritz4、M. Herrmann5
1. IKTS、積層造形とハイブリッド製造、ドイツ
2. フラウンホーファーIKTS、焼結および特性評価、ドイツ
3. フラウンホーファーIKTS、シェーピング、ドイツ
4. フラウンホーファーIKTS、プロセス／コンポーネント、ドイツ
5. フラウンホーファーIKTS（ドイツ

10 年以上前から、複雑で個別化されたコンポーネントを製造する技術セラミックスの積層造形（AM）は、近代的な生産風景に浸透しつつある。高ヤング率、高硬度、高強

度といったセラミックスの特性により、これらの材料は技術部品だけでなく、防衛分野の防護具や装甲にも適していることが知られています。特に関心が高いのは、受動的身体保護用の SiC や B4 C 材料のような、高硬度で軽量な装備品である。この目的のために、粉末ベースのバインダージェッティング技術（BJT）や材料押出ベースの溶融フィラメント製造（FFF）など、大容量の部品を製造するための積層造形法が使用されている。また、材料研究の枠内で超硬材料としてダイヤモンドなどとの複合材料が開発され、BJT や FFF で並行して使用されている。これらのセラミックスは高硬度であるため、機械加工がほとんど不可能であり、地質学的な利点もあることから、AM は特に魅力的である。プレゼンテーションでは、IKTS における AM 能力の概要、革新的なレーザー・ウォータージェット複合切断システムによる超硬ダイヤモンドライク材料の切断の結果、および最初のアプローチについて紹介する。

(ICACC-S15-020-2024) ステレオリソグラフィーで作製した SiO2 ベースの鋳型へのインベストメント鋳造により得られた W-Cu 複合構造体

G. ビアンキ*1
1.SUPSI、MEMTi、スイス

タングステン-銅（W-Cu）三周期極小表面（TPMS）形状をインベストメント鋳造で製造する新しい間接添加製造技術を提案する。このプロセスでは、ステレオリソグラフィー（SLA）と溶融銅鋳造を組み合わせることで、複雑な構造（ジャイロイドなど）を実現し、W と Cu の体積分率を制御して複合材料の特性を調整する。鋳造する物体のネガを再現するために、SiO2 をベースにした鋳型を SLA で製作した。タングステンとコーンスターチ（CS）粉末の混合物を SiO2 型に充填し、スペースホルダーとして使用することで、最終的な物体のポジ形状を得た。熱分解段階の後、W 多孔質構造に真空下で溶けた銅を浸透させた。塩基性溶液を用いて SiO2 モールドを浸出することにより、最終的な物体を得ることができた。製造されたサンプルは、CAD 設計の幾何学的特性を保持していた。

③ <u>バインダージェットとパウダーベッド融合プロセス</u>

(ICACC-S15-021-2024) 造粒粒子およびナノ粒子含有インクによるセラミックスバインダー噴射；粒子均質化モデリング（招待講演）

K.鴨田*1
1. 株式会社リコー 先端技術研究開発本部

セラミックス積層造形は、構造用セラミックス部品の製造に期待されているが、厚い部品を製造する場合、脱バインドの問題から造形品質（精度、密度など）に限界がある。本研究では、構造セラミックス製造のための粒子均質化モデリング（PHM）と呼ばれる新しいバインダージェッティング（BJ）法を提案する。PHM 法の特徴は、再コーティングパウダーに使用するセラミック造粒粒子と、セラミックナノ粒子を含むインクと、造粒粒子を崩壊させる溶媒にある。本研究では、提案する PHM 法の有効性を検証するため、グリーン体の相対密度をインク飽和度の関数として評価した。飽和度の増加により均質化が起こり、その結果、焼結体の相対密度の最高値は 95vol.%となっ

た。さらに、先行研究と比較して変形や割れが少なく、厚さ 10mm から 30mm のグリーン体を焼結した場合、収縮率は一定であった。厚さ 10mm 以上の部品を変形やクラックなしに作ることは、画期的なことである。セラミックス積層造形分野の発展に貢献する。この新しい PHM 法は、大型、高密度、高精度のセラミック部品の製造に利用できる可能性があり、将来的にはさまざまな産業分野にも応用できる。

(ICACC-S15-023-2024) 炭化ケイ素の層状スラリー堆積(LSDPrint)

N.H. シューベルト*2; A. ゾッカ 1; J. グエンスター2
1. BAM ドイツ連邦材料研究所、セラミック加工・バイオマテリアル部門
2. ドイツ連邦材料試験研究所（BAM

レイヤーワイズスラリーデポジション（LSD-print）は、スラリーベースのバインダージェッティングのバリエーションであり、高密度に充填されたパウダーベッドとバインダージェッティング法の精密なインク印刷を組み合わせたものである。ほとんどの積層造形（AM）技術と比較して、レイヤーワイズスラリーデポジション（LSD-print）は、セラミックスラリーの薄い層を広げて乾燥させることにより、高いグリーン密度と単一層の良好な相互接続を実現します。乾燥中に発生する高い毛細管力により、最大 60%のグリーン密度が可能です。プリントヘッドによるインクの噴射と組み合わせることで、希望する 3D パーツの 2D 断面が印刷され、最大 1mm までの複雑な形状が実現できます。熱処理後、印刷されたインクは硬化し、水中で安定した 3D パーツを生成します。今回のプレゼンテーションでは、炭化ケイ素セラミックスの LSD プリントに焦点を当て、従来の SiSiC に近い密度と機械的特性を持つシリコン浸透炭化ケイ素（SiSiC）パーツを製造する可能性について議論する。さらに、炭化ケイ素焼結体（SSiC）の LSD 印刷用スラリーの開発における課題と最近の進展についても議論する。

(ICACC-S15-024-2024) 狭チャネルおよびターンドチャネルを有する付加製造セラミック熱交換器のデパウダリング

M.Du*1; W. Yu1; D. France2; D. Singh1
1. 米国アルゴンヌ国立研究所
2. 米国イリノイ大学シカゴ校機械・生産工学部

デパウダリングは、PBAM（Powder Bed Based Additive Manufacturing）において重要なステップであり、プリント部品の周囲や内部にある未結合の粉末を除去する。この工程は、特に複雑な内部形状（例えば、幅の狭い溝や曲がった溝）を持つ設計では、未結合の粉末を内部まで除去することが困難な場合がある。本研究では、バインダージェット積層造形法を用いて、内部に複数層の流路を持つ一体型炭化ケイ素製熱交換器を印刷した。流路は半楕円形状（断面寸法 5.9×2.9mm）で、長さ方向に複数のターニング加工が施されている。この設計をデパウダー化するために、圧縮空気と渦運動を含む 2 つの方法が系統的にテストされた。空気圧と運動パワーが、交換器本体と流路表面の構造的・表面的一体性に及ぼす影響を調べた。その結果、渦流運動や圧

縮空気だけでは、印刷された熱交換器の内部の未結合粉末を部分的にしか脱粉できないことがわかった。その結果、この目的のために、渦運動と圧縮空気吹き込みの複数サイクルの組み合わせが開発され、試験された。その結果、最適化されたデパウダリングサイクルにより、構造的・表面的な整合性を維持しながら、効率的なサイクル数で、狭くて曲がっている流路を完全にデパウダリングできることが示された。

(ICACC-S15-025-2024) バインダ噴射および粉末床融合によるカーボン TPMS 構造の積層造形とポリマー浸透および熱分解

M.Pelanconi*1; P. Blyweert2; G. Bianchi1; V. Nicolas2; V. Fierro2; A. Celzard2 ; A.オルトナ 1
1. SUPSI、革新技術部門、スイス
2. フランス、ロレーヌ大学

本研究では、優れた機械的特性と耐酸化性を有し、良好な電気伝導性と熱伝導性を併せ持つ、三重周期極小表面（TPMS）形状の多孔性炭素ベース構造の設計、積層造形、および特性評価に焦点を当てる。グラファイトカーボンブラック粉末のバインダージェッティング（BJ）と PA11 の粉末床溶融法を用いて、異なるトポロジーと幾何学的空孔率を持つ 3 種類の TPMS の複合モデルを 3D プリントした。その後、フラン樹脂による浸透熱分解（PIP）を行い、部品の高密度化を行った。結晶化したグラファイト粒を結合する高度に無秩序な炭素マトリックスからなる複合材料が得られた。印刷および熱分解されたサンプルは、それぞれ直径 19mm、高さ 33mm、表面厚さ 0.76mm の高多孔質 TPMS シリンダーである。このサンプルは、圧縮カーボン-グラファイト複合材料や、直接インク書き込みやステレオリソグラフィによって製造された 3D プリントカーボンよりも優れた機械的特性を有している。高温試験では、アモルファスカーボンマトリックスはグラファイト粒子よりも酸化しやすいが、全体的な耐酸化性は非常に高いままであることが示された。これらの特性は、ジュール抵抗器や季節的な蓄熱への応用を可能にする。

(ICACC-S15-026-2024) 金属の無加圧溶融浸透のための多孔性アルミナプリフォームのバインダージェッティング

M.Mariani*1; E. Mercadelli2; C. Galassi1; N. Lecis1
1. イタリア、ミラノ工科大学機械工学科
2. CNR-ISSMC、セラミック材料開発科学技術研究所、イタリア

バインダージェッティングは、複雑なセラミック構造を製造するのに使用できる付加製造技術であり、金属の無圧溶融浸透による複合材料製造用の多孔質プリフォームとして利用できる。このプロセスは、2 つの材料間の濡れ性、プリフォームの孔径分布、温度勾配、ガス発生など、多くの要因に依存する。本研究では、プリフォームの特性を制御する可能性のある経路を決定するために、アルミナの異なる粒度分布と相組成が印刷および焼結条件に及ぼす影響を調査した。粒度分布測定、走査型電子顕微鏡、X 線回折、レオメトリーにより原料の特性評価を行い、流動性を評価し、粒子充填のための最適な粉末設計を決定した。印刷部品の密度は、その後の熱処理（硬化、プレ焼

結、1700/1750℃での焼結）により評価した。ボイド分布は、CT（コンピュータ断層検査）と顕微鏡写真を組み合わせて決定した。粒子サイズと層状堆積は、最終的な孔の寸法と配向に大きな影響を与える。最後に、多重浸透複合材料製造のためのガイドラインを設計するために、鋼、銅、亜鉛を用いた戦略が研究され、高性能セラミック複合材料の製造におけるバインダージェッティングの可能性が実証された。

(ICACC-S15-027-2024) 直接選択的レーザー焼結における SiC の結合機構

B.W. Lamm*1; O. Karakoc1; K. Mao1; T. Koyanagi2; J. Liu3; Y. Katoh2
1. 米国オークリッジ国立研究所材料科学技術部
2. オークリッジ国立研究所（米国
3. 米国ポーラーオニキス社

SiC の選択的レーザー焼結（SLS）は、複雑な形状の物体を製造するための魅力的な選択肢である。しかし、SiC のバインダーフリーまたは直接 SLS は、低いアズプリント密度と粒子結合メカニズムの限られた理解によって制限されてきた。本研究は、焼結助剤を含まない純粋な SiC 粉末を SLS して SiC チューブを作製する際のレーザーと SiC の相互作用を理解することを目的としている。ラマン分光法,電子顕微鏡法,X 線回折法による解析から、SiC 粒子の結合は SiC の不一致融解によって達成されることが示された。SiC のレーザー照射下での相変化は、計算された相図によって説明された。本研究により、異なる長さスケールにおける SLS SiC 微細構造、及び加工パラメータと微細構造の関係が明らかになった。本研究は、UT-Battelle,LLC との契約 DE-AC05-00OR22725 の下、米国 DOE、ARPA-E、Office of Fusion Energy Sciences の後援を受けた。

(ICACC-S15-028-2024) 積層造形法反応接合による高温セラミック部品

Z.Ahmad*1; T. Seager2; D. Cheikh2; B. Li2; B. McEnerney2; J. P. Borgonia2 ;
S.Firdosy2; K. Faber3
1. カリフォルニア工科大学応用物理・材料科学部（米国
2. NASA ジェット推進研究所（米国
3. カリフォルニア工科大学（米国

レーザー粉末床融合法（LPBF）による高温高密度材料の製造は、熱衝撃、不十分な高密度化、限られた光吸収率などの制限にしばしば遭遇する。これらの課題を回避するために、本研究では、LPBF と反応接合を統合した新しい積層造形法を提示する。この方法では、酸化アルミニウム、アルミニウム合金、二酸化ジルコニウムを含む特殊な粉末層を用いる。LPBF の間、アルミニウム合金は酸化物よりも低い温度（～660℃）で溶融し、熱衝撃を緩和しながら複合粉末の融合を促進する。LPBF 後、反応結合によりアルミニウムは酸化アルミニウムに変換される。さらに、反応結合プロセスの速度論と、製造されたコンポーネントの機械的、化学的、熱的特性に焦点を当てた研究が行われている。この方法は、ニアネットシェイプ構造に有望であり、宇宙船部品の熱機械的統合を改善するためのセラミック複合材料の広範な応用を探求するための基礎

となる。

(ICACC-S15-029-2024) 多酸化物直接インキ描画のための水性スラリーの開発と特性評価

P.Snarr*1; C. L. Cramer2; A. T. Nelson2
1. テキサス大学オースティン校（米国
2. 米国オークリッジ国立研究所製造科学部門

ダイレクト・インク・ライティング（DIW）は、複数の酸化物セラミック部品を印刷できる、押し出しベースの添加剤製造プロセスである。多酸化物 DIW は、製造された複数の部品の組み立てや、コーティングの塗布などの後処理工程を不要にする可能性がある。しかし熱特性は、焼結時のクラックなどの問題を引き起こし、材料特性に悪影響を及ぼす可能性がある。本研究では、マルチ酸化物 DIW に適した新規な ZrO2 および Gd O23 を含む水性スラリーを開発した。固形分、分散剤、粘度調整剤などのスラリー成分を調査し、スラリーレオロジーへの影響を調べた。最適な改質剤を決定した後、各スラリーのレオロジーはほぼ同じになり、均一な印刷が可能になった。さまざまな形状で製造されたコンポーネントの収縮挙動を、得られた微細構造とともに評価した。最終的には、マルチ酸化物 DIW システムの挙動を理解するために、各 DIW 処理工程を特性評価した。

④ 溶融フィラメント製造とダイレクトインクライティング

(ICACC-S15-030-2024) 複雑形状および柔軟な相互接続セラミック部品の付加製造のための水溶性原料（招待講演）

D.ペナー*1; R.ウィック＝ジョリアット 1
1.ZHAW チューリッヒ応用科学大学（スイス

材料押出 複雑な熱可塑性構造体の MEX は、多くの場合、水溶性支持体構造の確実な印刷に依存している。一般的に選択される材料はポリビニルアルコール（PVA）であるが、ほとんどのセラミック原料との印刷適合性が限られている（層の密着性が低い）ため、セラミック MEX 印刷に使用するのは困難である。市販の射出成形用バインダーシステムと混合した NaCl をベースに、一時的な水溶性支持体材料として新しい熱可塑性供給原料のコンセプトを開発した。アディティブ・マニュファクチャリングは、支持材の有無にかかわらずセラミックグリーン体の直接印刷だけでなく、一般的に水溶性金型材料の製造を通じて、新しい成形コンセプトの導入を可能にする。積層造形特有の利点である事実上無制限の形状の複雑さにより、アンダーカットモデル、ネジ山、溝、その他の複雑な金型要素の製造も可能になります。セラミックグリーンボディの直接 3D プリントの代わりに水溶性モールドを使用することで、現在利用可能な技術や材料の既存の制限を部分的に回避できる可能性があります。

(ICACC-S15-031-2024) セラミック基複合材料の溶融フィラメント製造のためのバインダー配合の開発と比較

O.Yucel*1; J. Binner2

1. バーミンガム大学冶金・材料学部（英国
2. バーミンガム大学セラミック科学・工学部（英国
アディティブ・マニュファクチャリング（AM）は、3D プリンティング（3DP）としても知られ、ポリマーをはじめ、セラミックスや金属の製造・造形方法として利用されてきた。この方法への関心は、コスト削減と、高価な工具を使わずに設計の自由度を提供できることから高まっている。セラミック材料の AM 開発は、ポリマーや金属に比べて比較的遅れている。セラミックの 3DP を改善するために、さまざまな AM 法が研究されている。溶融フィラメント法（FFF）はそのひとつで、セラミック粉末をポリマー・バインダー・システムと混合してフィラメントを製造し、これが印刷可能な原料になる。ZrSiO4 は、セラミックマトリックス複合材料を製造するために本研究で使用したセラミック粉末である。FFF の可能性を観察するため、3 つの異なる原料を用いたフィラメントを製造し、特性評価を行った。特性評価では、フィラメントとそれに続く複合材料のレオロジー的挙動、表面特性、曲げ強度、寸法公差を測定した。この研究結果は、FFF 用のバインダー配合を開発する上で、十分な理解をもたらすものである。

(ICACC-S15-032-2024) 鉛フリー圧電セラミックスの溶融フィラメント製造：フィラメント製造から焼結部品まで

S.Bhandari*1; P. Veteška2; G. Vajpayee3; L. Bača2; Z. Hajdúchová2 ; Z.Špitálsky4、M. Hinterstein3、G. Franchin1、M. Janek2
1. パドバ大学産業工学部、マルツォーロ通り 9 番地、イタリア
2. スロバキア・ブラチスラバ工科大学化学・食品技術学部無機材料学科、ラドリンスケーホ 9、スロバキア
3. フラウンホーファーIWM（ドイツ
4. スロバキア科学アカデミー高分子研究所（スロバキア
セラミックの溶融フィラメント製造（FFF）は、AM セラミック部品の幅広い普及を可能にする可能性があります。実際、このプロトタイピング法では、セラミックを装填したフィラメントを原料として利用し、ポリマー材料用の比較的安価な装置で、プロセス・パラメーターをほとんど変更することなく製造することができます。フィラメントの特性は、高品質のコンポーネントを製造する上で重要な役割を果たします。この研究では、さまざまな重量分率（BaTiO 3 が 60～80wt.%）の複合フィラメントを二軸押出機を用いて作製し、さらに SEM、圧縮機械試験、レオメータ、TGA によって特性評価を行い、スムーズで信頼性の高い印刷プロセスを確保した。印刷パラメータを最適化した後、印刷された（多孔質で緻密な）ペレット試料を注意深く脱バインダーし、緻密（～90%）で欠陥のないセラミック体を得るために焼結した。焼結されたサンプルは、相発生、微細構造、気孔径分布について特性評価された。作製した試料の誘電特性と強誘電特性の測定値は、既報の文献とよく一致した。他の AM 技術に必要な高価な装置や原料のレオロジーの精密な制御とは対照的に、この直進的で低コストの材料押出プロセスは、機能的な構造を印刷するためにさらに利用することができる。

(ICACC-S15-033-2024) 宇宙ミラー用炭化ケイ素積層造形法

M.Gauthe*1; X. Tonnellier1; L. Chaffron2; J. Rodolfo1; Y. Sortais3; C. Lorrette2
1. フランス、サフラン REOSC
2. パリ・サクライ大学、CEA、フランス
3. パリ・サクレー大学光学大学院（フランス

炭化ケイ素（SiC）は、宇宙やエネルギー用途など様々な分野で一般的に使用されている技術用セラミックである。この材料は、低密度、高剛性、優れた機械的・熱的特性、優れた酸化安定性により選ばれています。従来の焼結 SiC（SSiC）部品の製造には、グリーンマシニング、焼結、研削、研磨が含まれる。積層造形(AM)技術は、ニアネットシェイプのセラミック部品に新たな製造機会を提供している。これらの技術の中には、SiC の特性（紫外線吸収、焼結の困難さ）のために実施が困難なものもあり、反応結合 SiC を製造するように設定されるか、部品を固めるために浸潤法を使用するかのどちらかである。今のところ、無加圧焼結 SiC を製造できる可能性があるのは、FDM（Fused Deposition Modeling）のような押し出し法のみである。この研究では、FDM を用いて製造した SSiC 部品の微細構造および機械的特性（密度、硬度、ヤング率、曲げ強度）の測定を行った。粒径が数μm 程度、密度が 94%以上、硬度が非常に高いという有望な結果が得られた。しかし、3D プリンティングプロセス特有のマクロサイズのポロシティが観察された。気孔率と形状に対する 3D プリンティング・パラメーターの影響を理解するために、タグチの方法を用いた実験計画法が設定された。サンプルは、非破壊 X 線トモグラフィーを用いて検査した。

(ICACC-S15-034-2024) 押出し積層造形による多材料・多機能構造体の作製

L.Biasetto*1; V. Gastaldi1; G. Franchin1
1.イタリア、パドバ大学産業工学部

マルチマテリアル構造への 3D プリンティングの使用は、課題と機会の両方を伴う複雑な試みである。金属合金やセラミックのような材料を組み合わせることで、最初のプリントから後処理段階まで、処理パラメータの管理に複雑さが加わります。しかし、異なる金属材料とセラミックスをブレンドすることで、構造的・機能的特性を併せ持つ複合材料を作り出すことができるため、この課題はまた多くの可能性をもたらす。本研究では、コアシェル構造の製造に焦点を当て、押出ベースの積層造形の包括的な探求を提供することを目的としている。多様な材料の組み合わせと、それらの固有の特性について調査する。さらに、ノズルの最適化、インクの調合、正確な印刷パラメーターの調整、脱結合や焼結のような重要な工程など、重要な要因の詳細な分析も行う。これらの要素は、印刷された構造物の特性に大きな影響を与えます。また、印刷コアシェル構造の応用を説明するために、実用的な例を紹介する。これにより、先端製造業におけるこの技術の現実的な意味合いと革新的な可能性を強調する。

(ICACC-S15-035-2024) カーボン強化アクリロニトリル・ブタジエン・スチレン 3D プリントハニカム複合材料の検討

M.Ranaiefar*1; M. Singh2; J. Salem3; M. C. Halbig1
1. NASA グレン・リサーチ・センター（米国
2. オハイオ航空宇宙研究所（米国
3. NASA グレン研究センター、材料・構造、米国
ポリマー3D プリンティング技術の有用性が拡大し、高性能軽量構造への需要が高まったことで、さまざまな炭素強化ポリマー複合フィラメントが登場している。しかし、これらの材料の可能性を最大限に引き出すためには、そのプロセス-微細構造-物性の関係を詳細に評価する必要がある。本研究では、アクリロニトリル・ブタジエン・スチレン（ABS）と、カーボンナノチューブ（CNT）と 5 wt.%チョップドカーボンファイバー（CF）の炭素強化 ABS をハニカム形状で作製し、層厚とヘックスサイズの範囲にわたって調査した。材料断面の顕微鏡観察を行い、印刷パラメータと気孔率の関係を評価した。さらに、機械的特性は圧縮試験により評価し、ハニカム ABS、ABS-CNT、ABS-5 重量%CF ポリマー複合材料が、新しい 3D プリント構造体に応用できる可能性を示した。

(ICACC-S15-036-2024) セラミック積層造形の比較分析：溶融フィラメント法 vs. バット光重合法

I.Camargo*2; J. Verza1; C. A. Fortulan3; A. Luz4
1. UFSCar（ブラジル
2. IFSP、ブラジル
3. USP、ブラジル
4. ブラジル、サン・カルロス連邦大学材料工学部
バット光重合（VP）や溶融フィラメント法（FFF）は、低価格の 3D プリンタが広く普及していることから、著名な積層造形（AM）技術となっていますが、これらの機械は主にポリマー部品の製造に採用されています。セラミック製造の分野では、AM は設計の柔軟性、コスト効率、少量生産のリードタイム短縮などの利点を提供する。この研究では、異なる形状の印刷能力だけでなく、焼結部品の機械的強度と表面品質を比較するために、VP と FFF によって高度なセラミック部品を製造した。両プロセスとも、従来プロセスと同等の曲げ強度を持つ部品を製造することができた。一方、VP はその優れた表面仕上げにより、微小で複雑な形状の製造に優れていた。一方、FFF は、より大きな断面積（1000mm2 以上）の部品を作製したが、これは、この技術特有の周期的な剥離力のために、VP にとっては困難なことであった。これらの結果は、セラミック製造分野における両 AM 技術の将来性を強調するものであり、それぞれがそれぞれの長所と能力に基づいて独自のニッチを切り開く可能性がある。

(ICACC-S15-037-2024) ガラスセラミックシーラントのロボキャスト：実験計画法による水性インクのレオロジー特性と最適化

A.Baggio*1; F. D'Isanto1; D. Dalmazzo2; E. Santagata4; D. Basso3; D. Gaia3 ;
M.サルヴォ 1; F. スミアセット 1

1. トリノ工科大学応用科学技術学部（イタリア
2. イタリア、トリノ工科大学、環境・土地・インフラ工学科
3. スイス、FZSoNick
4. カタール大学土木環境工学部（カタール
SOLSTICE プロジェクト（欧州連合 Horizon2020、助成金協定第 963599 号）の枠組みにおいて、固体電解質 Na-Zn 電池の接合工程に関連するコストを削減することを目的として、従来の製法に代わる新しいガラスセラミック封止材が導入された。予想通り、固体負荷の組成を変更することでペーストのレオロジーが変化し、その結果、ロボキャスト成膜による新しいインクの印刷適性に影響を及ぼした。したがって、以前のペーストのレオロジー特性を忠実に再現するために、インクレシピを読み直す必要が生じた。この研究では、インクのレオロジーに及ぼす各成分の影響を調査し、実験計画法（DoE）を用いて最適化した。同軸円筒を備えたレオメータを使用して、いくつかのレシピをテストし、測定された各パラメータを考慮した実験に基づくモデルを作成した。検証されたすべてのモデルにより、特定のモデルに関連する特定のレオロジー反応に対する各ペースト成分の影響を評価することができました。最後に、収集されたすべての情報は、インクレシピを適切に調整するために使用され、その結果、以前の処方で示されたレオロジー挙動を再現することに成功しました。

（ICACC-S15-038-2024）レオロジーによる直接インク描画用セラミック懸濁液の印刷性の評価

L.O. Grant*1; R. Tao1; S. Romberg1; R. Maier1
1.米国国立標準技術研究所
セラミック用途でのダイレクトインクライト（DIW）の推進には、堅牢な原料計量と正確なシミュレーションが必要である。粘度、降伏応力、および粘弾性係数などのレオロジー特性は、DIW インクの印刷適性と密接に関連している。この研究では、ZnO 粉末の固形分充填率（40～50vol%）を変化させた水性インクのレオロジー特性に及ぼす粉末形態の影響を調べ、測定中のチキソトロピーと乾燥の課題に対処する際のベストプラクティスを共有する。1 つはギザギザの不規則な形態を持つ市販の ZnO 粉末で、もう 1 つは粒度分布がよく制御された球状の内部生成粉末である。印刷に関連するレオロジー特性の測定は、回転レオメータとキャピラリーレオメータを用いて行った。両方のレオロジー装置で 2 つの ZnO 粉末懸濁液を比較分析することにより、原料計量基準を改善し、DIW プロセスをシミュレーションする際の精度を向上させ、印刷適性測定基準を確立する際の指針を提供する可能性のある貴重な洞察が得られました。

⑤ ダイレクトライティングとマルチマテリアル

（ICACC-S15-039-2024）多機能部品のためのセラミック積層造形技術（招待講演）

T.Moritz*1、U. Scheithauer1、E. Schwarzer-Fischer1、S. Weingarten2
1. フラウンホーファーIKTS、プロセス／コンポーネント、ドイツ
2. アマリア・テクノロジーズ社（ドイツ
セラミック積層造形法は、生産的なレベルに到達しつつある。これらのプロセスの利

点は、特に多機能コンポーネントの製造において顕著である。本稿では、酸化物材料と非酸化物材料を介した導電性／電気絶縁性の組み合わせを持つセラミック部品の開発について述べる。アディティブ・マニュファクチャリング・ルートによるものである。使用されるプロセスは、VPP （ VatPhotopolymerization）と MMJ（Multi Material Jetting）である。マルチマテリアル加工における両プロセスの利点と欠点が示され、現在の開発結果と、さまざまな用途向けに両技術で製造された部品が裏付けされている。VPP が材料を層状に堆積させ、決められた波長の光で硬化させるのに対し、MMJ はディスペンサーを使い、熱可塑性の微小液滴を特定の位置に堆積させ、冷却するだけで固化させる。この方法によって、機能的に傾斜した構造を狙い通りに構築することも可能になる。VPP プロセスは、半透明のセラミック粒子、すなわちチタニアやジルコニアに適用される。対照的に、MMJ 技術はダークセラミックスや金属粉末のような不透明な粉末にも使用できる。

(ICACC-S15-041-2024) 3D プリンタによる電池用セラミック電解質の作製と特性評価

M.ファラル*1; A. ラヴァンチュール 1; M. ドレ 1
1. モントリオール大学、化学、カナダ

最近の 3D プリンティングの進歩は、全固体電池部品の設計に関心を持たせるだけでなく、成形特性の最適化と研究をサポートする。その柔軟性のおかげで、この技術は、従来の製造方法では不可能だった新しいアプローチを可能にする、カスタマイズ可能な形状を作成する可能性を提供する。しかし、システムへの統合を検討する前に、印刷可能な構造を開発・維持するためのインク処方、印刷パラメータ、性能の最適化には課題が残されている。文献には限られた情報しかないため、本研究の目的は、セラミック電解質を 3D プリントするためのパラメータを調査することである。研究の第一部は、複雑な構造を持つ固体複合電解質の印刷の限界と実現可能性を評価することである。そのため、犠牲ポリマーを使用したセラミックインク処方の開発を含め、直接インク描画技術について議論する。また、レオロジーによるインクの印刷性、加工性、直接インク描画による印刷の忠実性など、他の側面についても言及する。次に、局所的なイオン伝導性の特性評価法を用いて、その特性について説明する。これらの試験は、システム特性に対する加工技術の影響を評価するために行われる。

(ICACC-S15-042-2024) 航空宇宙アプリケーション用電池の直接描画積層造形（DWAM）と試験

Z.J. Tuchfeld*1; A. S. Almansour3; R. M. Sullivan3; D. Dornbusch3; M. Singh2 ; M.C. ハルビッヒ 3
1. 米国 NASA グレン研究センターUSRA
2. オハイオ航空宇宙研究所（米国
3. NASA グレン・リサーチ・センター（米国

オンデマンドで製造でき、航空機の充電、離陸、着陸のミッション・サイクルや緊急事態のためにエネルギーを貯蔵し、迅速に放電できる軽量でコンパクトなエネルギー貯蔵システムが切実に求められている。高度な材料合成と 3D 積層造形を利用すること

で、従来の電池製造における設計上の制約を克服することができる。本発表では、リン酸鉄リチウム（LFP）およびチタン酸リチウム（LTO）電池電極の電気化学モデリングによる設計と直接描画積層造形（DWAM）を最適化した。様々なインク配合が開発され、焼結パラメータが最適化された。印刷された電極の光学顕微鏡と形状分析を行った。DWAM 法は、LFP と LTO の両方で 20 層以上の均一な層が得られるように最適化された。さらに、電気化学的性能を向上させるため、異なる温度で焼結した材料のハーフセル構成でコインセル試験を実施した。これらのテストから、LFP には 550℃での焼結が理想的であることが判明した。また、カーボンでコーティングされた LFP 粒子は、カーボンでコーティングされていないものよりも優れていた。さらに、TGA、SEM、XRD 分析を行い、熱安定性、含水率、純度をさらに分析した。

(ICACC-S15-043-2024) マトリックス・ファースト：複雑な 3 次元セラミックマトリックス複合構造のための積層造形（招待講演）

S.Bottacin1、M. Pelanconi1、G. Bianchi1、A. Rosa1、A. Ortona*1
1.SUPSI、革新技術部門、スイス

この研究は、任意の方向および体積分率で配置された連続繊維で強化された複雑なセラミックマトリックス複合構造の計算デザインおよび積層造形に焦点を当てています。選択したマトリックス材料に応じて、PBF、BJ、SLA などの異なる AM 技術を使用して製造することができる。次に、繊維束をマトリックスの空洞に貼り付けます。プリントされ熱処理されたサンプルは、TPMS のような非常に複雑な構造で、その後 PIP、CVI、RMI によって高密度化することができる。軽量で高温の部品が必要な場合に使用できる。異なる繊維体積分率でサンプルを作製し、特性を評価した結果、コンセプトは実証されたが、性能を最適化するためにはさらなる研究が必要である。

(ICACC-S15-044-2024) 月高地レゴリス模擬インクの直接描画と耐候性

A.マルノー*1; B. ブレットマン 1
1.ジョージア工科大学、化学・生体分子工学、米国

ダイレクトインクライト（DIW）3D プリンティングを月のレゴリス模擬物質と組み合わせて使用することは、今後の Artemis ミッションで ISRU を推進する上で特に興味深い。DIW インクの幅広い調合設計パラメータにより、この 3D プリンティング法は、月面特有の環境要求に対して高度にカスタマイズ可能である。しかし、このような独特の環境に対する処方設計のガイドラインやベストプラクティスは不足している。我々の仕事では、極寒と真空での操作を容易にするために、UV 硬化固化を押出し後に利用することにした。インクは、光重合性バインダー中に懸濁された高負荷（60vol%）の固体粒子で構成され、-30℃で押し出され硬化される。月の昼と夜の温度間で熱サイクルを行い、プリント全体とバインダー-粒子間における空隙率の変化と引張強度を評価した。この研究は、新素材と新しい困難な環境の両方に対するインク処方設計のさらなる指針を得ることを目的としている。

(ICACC-S15-045-2024) 自由形状セラミックス製造のためのハイブリッド積層造形法

A.De Marzi*1; K. Huang1; P. Colombo1; G. Franchin1
1.パドヴァ大学産業工学部（イタリア
ほとんどのAMアプローチに関連する共通の欠点は、層ごとの構造から生じる。オーバーハングや小さな特徴を持つ複雑な形状の印刷では、構造的な崩壊を避けるために、支持構造、余分な材料、または犠牲材料を追加する必要がある。さらに、層が積み重なると、複数の層間界面が存在することになり、部品表面に階段状の効果が生じるため、印刷部品の強度と機械的応答が低下する。複数の製造技術を独自のハイブリッド・システムに組み合わせることで、以下のことが可能になる。は、前述の限界を克服するための新しい解決策である。ここでは、光硬化性懸濁液をノズルから押し出し、外部UV光源で硬化させるハイブリッド押し出し-光重合プロセス（UV-DIW）を紹介する。UV-DIWセットアップの可能性を、6軸ロボットアームと組み合わせて実証し、プレセラミック前駆体や透明および暗色セラミック粒子の懸濁液を用いて複雑な自由形状を作製する。具体的には、ポリシロキサン、シリカ、および窒化ケイ素ベースのインクを調製し、異なる格子構造を製造するために使用した。インクの反応性、粒子の表面特性、および液体と粒子の相互作用力が、インクのセラミック収率、流動挙動、および自由形状形成能力を制御する最も重要なパラメータであることが判明した。

(ICACC-S15-046-2024) レーザー誘起スリップキャスト(LIS)によるセラミックスの水系積層造形

A. Zocca*1; H. Schubert1; T. Mühler2; J. Guenster1
1. BAM ドイツ材料科学・生産技術研究所、先進マルチマテリアル・プロセッシング
2. QEP3D GmbH（ドイツ
レーザー誘起スリップ鋳造は、水性セラミックスラリーを使用するセラミック材料用に特別に開発された付加製造技術である。このプロセスは、トップダウン方式のバット光重合と同様の方法で層ごとに行われ、上部に配置されたレーザーエネルギー源によって各層を選択的に圧密します。セラミック充填樹脂を選択的に架橋させることで圧密を達成するバット光重合とは対照的に、LISでは低量の有機添加剤（通常5wt％未満）を含む水性スラリーを原料として使用する。LISでは、スリップキャスティングに似たメカニズムに従って、懸濁液が鋳型を形成する崩壊を引き起こす水の局所的な蒸発によって、グリーンボディが形成される。セラミック粒子を効果的に分散させ、グリーン強度を高めるために必要な有機添加物はわずかである。この技術は非常に汎用性が高く、水に分散可能なすべてのセラミック系に適用できる。主な利点のひとつは、炭化ケイ素のような暗色の材料であっても、光の散乱や吸収に関する問題なしに処理できることである。プレゼンテーションでは、他のAM技術と比較したLISの長所と限界について議論し、アルミナおよび炭化ケイ素セラミックスの最新の結果を紹介する。

(ICACC-S15-047-2024) 可能性を探る：積層造形によるワイヤレス埋め込みセラミッ

クセンサー

N.Reed*1; J. B. Shivakumar2; S. C. Perry3; K. Cootel; E. Rojas-Nastrucci2 ;
D.キム 1
1. エンブリー・リドル航空大学 航空宇宙工学科 （米国
2. エンブリー・リドル航空大学 電気工学・コンピューターサイエンス（米国
3. エンブリー・リドル・エアロノーティカル大学 機械工学（米国

アディティブ・マニュファクチャリング（AM）は、センサーを組み込んだ構造部品の開発を可能にし、加速させている。独自の AM プロセスにより、従来の製造方法では実現できなかった複雑な部品の内部構造への広範なアクセスが可能になった。しかし、このような進歩にもかかわらず、センサーを組み込んだセラミック構造体の製造は依然として大きな課題となっている。セラミック部品の有利な耐熱性と剛性は、埋め込みセンサーを組み込むために構造体を加工しようとする際に、明確な課題を提示します。この研究では、高温での基板の内部特性を正確に測定するために、付加的に製造されたセンサーを組み込んだセラミック構造の開発を探求します。FDM（Fused Deposition Modeling）プロセスを利用して、ワイヤレスセラミックセンサーを印刷し、さらにセンシング素子とアンテナを重ねます。センサーが完全に封入され、焼成された後、完成したセンサーはデジタル光処理（DLP）セラミックに加えられる。製造工程で基板と一体化する。この一体化は、一旦硬化すると、センサーを基板に完全に包み込んで接着し、一体化した構造を作り出します。後処理後、完成したサンプルは、下地のセラミック材料の有益な熱的・機械的特性を保持したまま、ワイヤレス・センシングを行うことができる。

３）その他、骨、歯、インプラント、医療、バイオセラミックス等に関わる講演

ダイバーシティ起業家精神と 商業化に関する特別集中セッション

(ICACC-DIV-001-2024) ジュビリー・グローバル・ダイバーシティ賞：機能的（硬・軟）組織再生のための多機能デリバリープラットフォームとしてのナノ構造バイオセラミックス

S.フィオリッリ*1
1.トリノ工科大学応用科学技術学部、イタリア

組織再生の障害に関連する課題を克服するため、現在、治癒がうまくいかない根底にある複数の連動した原因を同時に標的とすることができる臨床的解決策の設計に、広範な研究努力が払われている。治療薬（薬物、イオン、生体分子など）を貯蔵・送達するための極めて高い表面積と、オンデマンド放出特性を付与するための容易な後機能化により、ナノ構造バイオセラミックスは、組織再生の分野において、スマートな多機能ナノキャリアとしてうまく利用されている。本講演では、骨、皮膚、心臓組織における有害なリモデリングを防ぐための先進的なアプローチとして、複合 3D スキャ

フォールド、注入可能なセメント、柔軟なナノファイバーパッチへの生物活性ナノキャリアの組み込みに関して、主に欧州連合から資金提供を受けている共同プロジェクトの枠組みの中で行われている研究活動の概要を紹介する。また、臨床医と共同で実施した包括的な物理化学的特性評価と in vitro/in vivo 生物学的評価についても報告し、関連する未解決の課題と将来の展望を強調している。

FS1 バイオインスパイア／グリーンプロセス・先端材料関連技術

(ICACC-FS-001-2024) 先端材料のための収束的生物学的デザイン（招待講演）

D.キサイラス*1
1.カリフォルニア大学アーバイン校材料科学・工学部（米国

何百万年もの間、生物は淘汰圧に応答して、最適な生物学的設計の道しるべとなる特定の形質セットを獲得してきた。その典型的な例が、植物、無脊椎動物、脊椎動物の異なる系統における強靭な構造の進化である。極めて強靭な構造は、鎧や打ち出の小槌、あるいは補強材のような役割を果たし、生物が競争に勝ち、仲間を見つけ、食物を獲得し、捕食から逃れる能力などを高める。自然のシステムは、利用可能な出発材料の限られた選択肢から材料を合成し、構築するために、うまく調整された戦略を発達させてきた。その結果得られた構造は、驚くほど忠実なマルチスケールアーキテクチャを示し、しばしば工学材料が示す機械的特性よりも優れた特性を示す。マルチスケール構造の比較解析の中には、どの設計原理が収束的に生じたかを突き止め、別々の進化経路に最適化された解を示唆するものもある。これは極限状態での生存に必要なことである。この研究では、収束的な設計を示すこれらのシステムのいくつかを説明し、有機スカフォールドを用いた制御された合成と階層的な組み立てが、どのようにしてこれらの統合されたマクロスケール構造につながるかを述べる。また、それらの機能と、工学的応用に用いられる生体模倣材料への変換について述べる。

(ICACC-FS-003-2024) ペプトイドを用いた結晶性ナノ材料のバイオインスパイアード合成（招待講演）

C.チェン*1
1.米国パシフィック・ノースウエスト国立研究所

自然界において、バイオミネラル（骨など）は、その形成と機能が、高い情報量を持つバイオマクロ分子によって、複数の長さスケールにわたって制御されている階層的複合材料の例である。自然界に触発され、多くのバイオミメティック・アプローチが結晶性ナノ鉱物の設計と合成のために開発されてきた。これらのアプローチは、温和な水性合成条件下で複雑な機能性材料を生成することができるため魅力的である。バイオインスパイアード材料合成のための新しいアプローチの開発は進んでいるものの、結晶性ナノ材料の予測可能な合成につながる高分子設計のルールは、依然として不明なままである。最先端のペプチド模倣体のひとつであるペプトイドは、バイオインスパイアード材料合成に多大な機会を提供する。本発表では、結晶性ナノ材料の制御された合成のための、ペプトイドに基づく 2 つのアプローチについて議論する。一

つ目は、無機ナノ材料の形成と形態形成を制御するための界面活性剤様ペプトイドの設計と合成である。第二のアプローチは、自己組織化ペプトイドを利用して、階層的複合ナノ材料の制御合成を行うものである。その場観察（in situ TEM など）と分子シミュレーションの組み合わせにより、ペプトイドによる結晶性ナノ材料の形成におけるペプトイドと粒子付着の重要な役割を解明する。

（ICACC-FS-007-2024）歯エナメル質のナノおよびメソスケール構造と組成について（招待講演）

D. ジョースター*1
1. ノースウェスタン大学 材料科学・工学部 （米国

歯科用エナメル質はヒドロキシルアパタイト結晶で構成され、その何千もの結晶が束ねられて棒状になり、三次元的な編み目状に組織化されている。この構造により、優れた耐破壊性が得られ、疲労寿命が大幅に向上する。エナメル質の酸腐食感受性は、Mg2+、Fe(III)、CO3 2-、およびF-の存在に依存する。しかし、エナメル質におけるこれらの微量成分の分布を画像化することは、依然として困難であった。我々は最近、UV レーザーパルス原子プローブトモグラフィー（APT）と相関イメージングおよび分光学的手法を併用することにより、これらの微量成分がネズミのエナメル質結晶を固める非晶質粒界相に豊富に含まれていることを発見した。ここでは、げっ歯類のエナメル質とは異なり、ヒトのエナメル質においても、個々の結晶粒間に非常に特徴的なイオン勾配が存在するという最近の発見について報告する。エナメル質の力学的特性、溶解挙動、歯の発育に与える影響について述べる。さらに、サブマイクロメートルのプローブサイズを持つX線回折を用いて、エナメル質ロッドとそれを隔てるロッド間エナメル質にわたる結晶子の特性と組成をマッピングするための高感度アプローチについて述べる。われわれの測定結果は、桿状エナメル質と桿状エナメル質間の組成に系統的な違いがあることを示しているが、個体間のばらつきを制御する他の要因についても示唆している。

（ICACC-FS-009-2024）バイオミメティックおよびバイオジェニックハイブリッドセラミックスにおけるナノスケール組立プロセスから強靭化テクスチャーまで（招待講演）

S.E. ウルフ*1
1. フリードリッヒ・アレクサンダー大学エアランゲン・ノイエンベルク、材料科学・工学部、ガラス・セラミックス学科、ドイツ

バイオミネラルは、生物由来のハイブリッドセラミックスであり、高い機能密度と耐損傷性を持つ高性能材料へと進化してきた。そのユニークな特徴は、材料や合成の新しい設計のためのインスピレーションの源となり、そのプロセス-構造-特性の関係を詳細に分析する動機となっている。これらの「バイオセラミックス」の生合成過程では、一過性の非晶質相が決定的な役割を果たし、その後、形状を保持したまま結晶化する。バイオミネラルは、ガラスセラミックスの形成を彷彿とさせるが、常温条件下で起こるこのプロセスを絶妙に制御することで賞賛されている。以前の研究では、単

結晶に近いバイオミネラルが注目されていたが、現在では複雑な多結晶バイオミネラルが主流となっている。ここでは、様々な結晶テクスチャーを持つ（バイオ）セラミックスは、破片や鈍的な接触損傷に対する耐久性を向上させる機能的に傾斜した材料であることを提案する。このような複雑な結晶テクスチャーの形成は、ナノ粒子降着プロセスによる非古典的な形成に固有のものであり、生体模倣的な鉱物化プロセスによって模倣できることを示す。この予期せぬプロセス-構造-特性の関係は、機能性材料を生成するためにナノ粒子をベースとした非古典的なルートを採用する（生体）合成アプローチの未開発の可能性を浮き彫りにしている。

(ICACC-FS-010-2024) バイオプロセスに触発されたファブリケーション：バイオミネラル形成から材料創製まで（招待講演）

Z.ゾウ*1
1.武漢理工大学（中国

生物は、その生物学的機能を果たすために、様々な種類の物質を作り出すことができる。例えば、バイオミネラリゼーションは、貝殻、骨、歯など、機械的性質に優れた硬いバイオミネラル（生体鉱物）を生成するプロセスである。このような生体物質の生成過程を、生物学的制御や化学反応から構造-機能相関に至るまで理解することは、機能性材料創製のヒントになると考えられる。ここでは、サメの歯の形成過程の解明、アモルファス物質の結晶化機構の解明、緻密な炭酸カルシウムセラミックスの室温作製に関する最近の研究について紹介する。

FS3 化学センサーのためのナノ構造と低次元材料

(ICACC-FS3-006-2024) 医療診断用低次元セラミック化学抵抗ガスセンサー（招待講演）

O.K. Varghese*2; D. Waligo2; B. Kandel2; M. Paulose1
1. ヒューストン大学物理学科（米国
2. ヒューストン大学物理学科・テキサス超伝導センター（米国

金属酸化物半導体は、環境中の化学種の濃度の関数として電気抵抗を大きく変化させる能力で有名である。一般に化学抵抗挙動と呼ばれるこの特性は、60 年以上にわたってガス・センサーの開発に利用されてきた。このようなセラミック材料の多くは、非セラミック半導体と比較して、機械的・化学的に安定しており、安価である。とはいえ、多くの化学物質が混在する環境から特定の分析物を識別できない、非常に低濃度の分析物（100 万分の 1 から 10 億、1 兆レベル）に対する感度が不十分である、といった問題は、セラミックセンサー技術の商業化の見通しを損なう共通の問題である。低次元金属酸化物は、このような問題に対処する方法を提供するため、この点で有望である。低次元金属酸化物は非常に大きな表面積を持ち、表面状態や微細構造によって電気的応答を強く制御することができる。その結果、ナノ構造酸化物半導体をベースとしたセンサーは、身体の健康状態に関する情報を伝達する、呼気中の低濃度ガスや揮発性有機化合物の検出にますます応用されつつある。本発表では、当研究室で最

近開発された新規材料のセンシング性能に焦点を当て、この非侵襲的技術の進歩について議論することを目的とする。

(ICACC-FS3-015-2024) リアルタイム健康モニタリングのための生体適合性、ウェアラブル、カスタマイズ可能な化学センサーシステム（招待講演）

T.Kim*1; S. NajafiKhoshnoo2; J. A. Tavares-Negrete2; X. Pei2; P. Das3; S. Lee4 ;
J.ラジェンドラン 2; R. エスファンディアープール 2
1. ベイラー大学 機械工学（米国
2. カリフォルニア大学アーバイン校（米国
3. シクシャ・オ・アヌサンダン大学技術教育研究院（インド
4. テラサキ・インスティテュート・フォー・バイオメディカル・イノベーション（TIBI）、米国

生体流体の pH をモニターすることは、ヘルスケアにおいて大きな意味を持つ。感染症の検出、創傷のモニタリング、病気の診断などに役立つツールである。しかし、既存のセンサーシステムには、高価でかさばるという限界があり、リアルタイムの健康モニタリングには不適切である。有望な解決策は、生体適合性があり、装着可能で、柔軟性があり、ユーザーの生体流体の連続的でリアルタイムの化学的センシングデータを提供するセンサーシステムの開発にある。柔軟性があり、カスタマイズ可能で、低コストの化学センサーシステムは、ナノ材料ベースのインクを 3D プリントすることで開発できる。3D プリンティングの素晴らしさは、手頃なコストでカスタマイズ可能なオーダーメイドのソリューションにある。この化学センサーシステムは、電池不要の読み出しシステムで動作させることもでき、ワイヤレスデータ伝送による連続リアルタイムモニタリングを実現する。このアプローチで開発された pH センサー・システムは、3.0 から 4.0 までの pH 範囲をカバーする高い感度、特異性、信頼性の高い検知性能を示している。10.0.さらに、優れた生体適合性と pH を示す。創傷モデルのモニタリングに成功した。このウェアラブル pH センサーシステムは、健康モニタリングのためのリアルタイムでカスタマイズ可能な化学物質センシングを可能にする統合プラットフォームを表している。これは、個別化医療の極めて重要な進歩である。

S7 第 18 回持続可能なエネルギーハーベスティングのための機能性ナノ材料・薄膜に関する国際シンポジウム

(ICACC-S7-017-2024) 生物製剤用薬物ナノキャリアとしてのフラクタル様形態を有する発炎リン酸カルシウムナノ凝集体（招待講演）

G. ソティリウ*1
1. カロリンスカ研究所（スウェーデン

生物学的製剤（タンパク質、ペプチド、ヌクレオチド）は、新薬市場を支配している。しかし、生物学的製剤を使用する上で大きな障害となっているのは、生体内で酵素的に分解され、副作用の原因となる高用量を必要とすることである。生物製剤の分

解を避ける一つの方法は、脂質ベースのナノ粒子などのナノキャリアに封入することである。別のアプローチとしては、リン酸カルシウム（CaP）のような生体適合性のある無機ナノ粒子を用いる方法がある。本研究では、フラクタルのような形態と高い比表面積を有する火炎エアロゾル技術によって作製された無機 CaP ナノ凝集体を利用することにより、生物製剤の薬物担持能力を向上させることを目的とする。我々は、組成、サイズ、結晶化度などのナノ粒子特性を調整できる火炎噴霧熱分解法を用いている。これらのパラメータは、細胞への取り込み様式を決定するため、非常に重要である。我々は、抗菌ペプチドデリバリーキャリアとワクチン接種用アジュバントという 2 つの異なる用途をターゲットに、CaP ナノ粒子の生物製剤への担持を最適化した。開発した粒子の性能は、生物学的薬物送達のための最先端の脂質ベースのナノ粒子と比較した。本研究で開発されたフレームメード CaP ナノ粒子は、生物学的製剤の送達に有利な特性を示し、高い担持量と最小限の細胞毒性を示した。

(ICACC-S7-018-2024) 生体内蛍光 X 線バイオイメージングのための無機ナノ粒子の最新動向（招待講演）

M.S. Toprak*1
1.KTH 王立工科大学応用物理学科（スウェーデン

ナノ粒子（NPs）は、ハイブリッド材料からセンサー、抗ウイルス／抗菌コーティング、様々な生物医学的応用まで、多くの分野で利用されている。それぞれの応用分野には、それを成功させるために遵守しなければならないナノ粒子の特性があります。我々は、特にボトムアップの溶液化学的手法を使って、多様な生物医学的応用のためのセラミック・ナノ粒子のさまざまなファミリーを設計してきた。必要であればいつでも、個々のナノ粒子は、その表面機能性を利用したカップリングメカニズムによって、より大きなミクロンスケールのアーキテクチャーに組み立てられた。この点で、所望の材料特性に到達するためには、適切な表面化学を用い、工程数を最小限に抑えることが最も重要である。本講演では、蛍光 X 線バイオイメージング（XRF）専用に設計された材料と最近の活動について紹介する。第一世代から始まり、コアシェル粒子や様々な表面機能化スキームの開発まで。また、開発した NP を用いた in-vitro および
in-vivo 研究についても紹介する。

S8 第 18 回構造・多機能材料とシステムのための APMT 国際シンポジウム

(ICACC-S8-022-2024) 冷間焼結プロセス：緻密でナノメトリックなハイドロキシアパタイトセラミックスおよびバイオコンポジットを開発する新しい方法（招待講演）

M.Kumar1、M. Ben Achour1、M. Lasgorceix1、R. Mincheva2、J. Raquez2；
A.L. Leriche*1
1. オー・ド・フランス工科大学 CERAMATHS DMP（フランス
2. ベルギー、モンス大学、高分子・複合材料研究室

冷間焼結プロセス（CSP）は、低温（≦300℃）・高圧（≦500MPa）の過渡的な液体の

存在下でセラミックスの緻密化を促進する非従来型の低エネルギー焼結技術である。この新しいプロセスは、機械的および生物学的特性を向上させるために、従来の焼結のように低温で緻密なハイドロキシアパタイトを達成するために特に重要である。さらに、セラミックとポリマーの共焼結のための新しい戦略も提供する。冷間焼結の利点を生かし、本研究ではハイドロキシアパタイト(HA)をナノスケールで高密度化することと、骨再生応用のための HA/ポリ乳酸(PLA)ベースのコンポジットの共焼結を目指した。商業的に合成された HA 粉末の冷間焼結における、液相の有無やその化学的性質（水、酢酸、リン酸）のような主要な処理パラメータの影響を評価した。特にハイドロキシアパタイトセラミックスの密度と微細構造に対するプロセスパラメーターの影響が実証された。複合材料の場合、異なる相溶化剤が HA/PLA 複合材料の均質性に及ぼす影響が調べられた。

(ICACC-S8-028-2024) 人工光硬化性エマルションからの新規バイオセラミックス/ポリマー複合材料

E.ベルナルド*1、H.エルサイード 1、B.ザバン 2
1. イタリア、パドバ大学産業工学部
2. フェラーラ大学トランスレーショナル医学部（イタリア

水和硝酸カルシウムは、バイオセラミックスの興味深い前駆体である、例えば、バイオガラス用のゾル-ゲル製剤など。有機液体には溶けないが、融点が低いため、エマルション化による均一化が可能である。この論文では、溶融した水和硝酸カルシウムの液滴を、生体適合性のあるバイオ由来の光硬化性樹脂に分散させることによって得られるエマルジョンの槽内光重合による新規複合材料の実現可能性について議論する。エマルションの安定性は、界面活性剤の使用と、電気加熱式印刷ヘッドによる印刷槽のわずかな加熱（40～50℃）によって向上する。硝酸カルシウムナノ粒子は、モル比と浸漬時間（1～7 日間）を変化させながら、印刷後の足場をリン酸ナトリウム溶液（密閉容器内、60℃）に浸漬するだけで、後に完全に炭素化ヒドロキシルアパタイトに変化する。高温での焼成工程がないため、有機相の分解が防止され、導電性破壊のない複合体が得られた。予備的な細胞試験により、生体適合性と生物活性の両方が確認された。

S9 多孔質セラミックスの新展開と応用

(ICACC-S9-005-2024) リグノセルロース系機能性フォームの設計と特性評価

J.Zhang*1; S. Gupta1
1. ノースダコタ大学 機械工学科 （米国

リグノセルロース系バイオマスは、地球上で最も豊富な有機高分子である。近年、リグノセルロース系バイオマス原料は、持続可能で再生可能、かつ経済的な石油由来製品の代替品として注目されている。変換技術の発展に伴い、リグノセルロース系材料は、バイオ医療製品、バイオプラスチック、建築材料、断熱材、水処理、エネルギー貯蔵など幅広い用途に応用されている。本論文では、様々な種類のバイオマスを用い

たバイオフォームの設計に関する最新の開発について報告し、複数の用途に向けたバイオフォームの特性評価を行う。その結果、バイオフォームの特性は、処理条件やバイオマスの種類の選択によって調整できることがわかった。300℃で熱分解したバイオフォームは疎水的な挙動を示し、自重の 80%まで油を吸収することができた。熱伝導性試験では、バイオフォームが良好な断熱材であることが示された。

(ICACC-S9-013-2024) ハイドロキシアパタイト-ジルコニア繊維バイオセラミックス複合体のナノスケール-マイクロスケール 3D トモグラフィー解析による空隙分布の検討

M.スラマ*1、M.クロルス 1、D.ドルドリック 2、J.シフラー2
1. チェコ、TESCAN グループ
2. チェコ、セイテック

材料の組成と空隙率のバランスは、力学的特性と生物活性にとって極めて重要である。チェコ共和国のブルノにある CEITEC および BUT と共同で行った以前の研究では、材料の破壊靭性を高めるために、ハイドロキシアパタイトを ZrO2 繊維で強化した。複合材料は、電気泳動堆積法（EPD）を用いて作製した。EPD プロセスでは調整が容易であるため、さまざまなレベルの気孔率を持つ析出物が得られる。したがって、アルキメデスのような従来の方法では、気孔率の合計値に関する情報しか得られず、サイズ分布の情報がないため不十分である。3D トモグラフィ法、特にマイクロ CT（X 線顕微鏡）は、非破壊で高精度の気孔率分布分析に適しています。このような手法の限界は解像度である。ナノメートルスケールの気孔率を測定するには、FIBSEM トモグラフィのような他の方法が適している。とはいえ、3D FIB-SEM トモグラフィは、分析体積と検出される空隙の最大サイズに制限があり、破壊的な手法である。これらの 3D トモグラフィ技術を組み合わせることで、マイクロスケールからナノスケールまでのマルチスケールで、多孔質の全体的な分布を評価することができる。マルチモーダルな特性評価アプローチは、マルチスケールの情報を組み合わせ、独自のデータを提供してくれるだろう。

(ICACC-S9-014-2024) セラミックフォームの人工組織再構成アルゴリズムと剛性特性評価

V.Deshpande*1; R. Piat1
1.ダルムシュタット応用科学大学、数学・自然科学、ドイツセラミック発泡体の構造と物性の関係を決定するための数値研究には、統計的に有意な数の微細構造サンプルが必要である。このようなサンプルの製造とマイクロ CT スキャンは、コストがかかり、面倒なプロセスです。そのため、再構成アルゴリズムによってサンプルを数値的に生成する方法があります。この研究では、CT スキャンで得られた実際の微細構造と同じ統計的相関関数を持つ等価微細構造を生成する新しい再構成アルゴリズムについて述べる。研究対象材料の微細構造

は、互いに連結した多分散気孔のように見える。Young-Torquato 法に基づき、このアルゴリズムは初期微細構造として気孔のランダムな分布を作成し、各反復において、

収束が達成されるまで気孔の位置をランダムに変化させることにより、気孔に摂動を与える。さらに、再構成試料と実試料の有効剛性係数を数値計算し、実験値と比較した。再構成試料の引張剛性係数とせん断剛性係数の実測値に対する偏差は、それぞれ1.8%と5.2%であった。実測値との比較では、それぞれ10%と20%であった。この結果は、再構成アルゴリズムが、実際のものと統計的に同等であるだけでなく、現実的な剛性特性を持つ微細構造を生成することを示している。

S17 フォトニクスとエネルギーのための先端セラミック材料とプロセス

(ICACC-S17-004-2024) 発光ナノプラットフォーム (招待講演)

F.ヴェトローネ*1

1. ケベック大学エネルギー・材料・電気通信センター、INRS（カナダ

近赤外（NIR） で励起され、発光することができる発光ナノ材料は、ヒトの健康と生物学に関連する多くの用途に使用するために研究されてきた。これらの材料は、光を外部トリガーとして使用するセラノシス（治療・診断）プラットフォームとして大きな注目を集めている。NIR光は、高エネルギー光よりも組織を透過しやすく、特に波長が、組織が光学的に透明である3つの生物学的窓の範囲内にある場合には、より効果的である。NIR励起ナノ材料の最前線にあるのは希土類ドープ・ナノ粒子（RENPs）であり、その4f電子エネルギー状態により、通常の（ストークス）ルミネッセンスを起こし、3つのNIR生物学的窓で発光することができる。しかし、他のナノ粒子とは異なり、RENPは多光子過程（アップコンバージョンとして知られる）を経ることができ、NIR励起光はより高いエネルギーに変換され、紫外-可視-NIR領域にまたがる反ストークス発光をもたらす。その光学特性の多様性により、NIR発光を診断（バイオイメージング、ナノサーモメトリー）に利用しながら、他の光活性化治療法（薬物放出など）の引き金となる高エネルギー光（UVまたは青色）をその場で発生させることが可能になった。ここでは、多様な近赤外励起（および発光）RENPの合成を紹介し、その発光特性をどのように利用すれば多様な生物医学的応用に利用できるかを示す。

(ICACC-S17-017-2024) フォトニクスとエネルギーのための先端セラミック材料とプロセス (招待講演)

R.ナラヤン*1

1.ノースカロライナ州立大学（米国

二光子重合は、医療機器、特に小規模な機能を有する医療機器のスケーラブルな大量製造において、従来のプロセスよりも大きな利点を提供する。二光子重合で使用される原料（例えば、無機-有機ハイブリッド材料やアクリレート系ポリマー）は、低コストで入手可能である。二光子重合は典型的な"ダーティー "製造環境で確立することができ、クリーンルーム設備は必要ない。二光子重合は、小規模な特徴を持つ複雑な構造を製造するための、簡単でシングルステップの方法である。二光子重合法は、一般的に使用されているマイクロニードル作製技術よりも幅広い形状と寸法のマイクロニードルを作製できることが示された。例えば、無機-有機ハイブリッド材料から作製さ

れた中空マイクロニードルは、薬物送達のためにブタの皮膚に孔を形成するのに使用された。二光子重合法を用いて無機ハイブリッド材料から作製された数種類のマイクロニードルおよび他のタイプの医療機器について議論する。

ポスターセッション

(ICACC-P003-2024) 3D プリントした PLA-TCP-SiO2 と PLA-TCPMgO 組織工学用複合足場

E.Kolanthai*1; S. V. Harb2; S. Seal3; L. Pessan2
1. 米国セントラルフロリダ大学材料科学・工学部
2. サン・カルロスフェデラル大学材料工学部（米国
3. セントラルフロリダ大学米国

生体活性で生分解性の足場は、人体における新組織の成長を導くための一時的なテンプレートとして研究されてきた。ポリ乳酸（PLA）にβ-リン酸三カルシウム（TCP）、SiO2 、MgO などの生体活性フィラーを添加し、硬組織修復用の 3D 足場を作製することを目指した。1, 5, 10 wt%の SiO2 または MgO を含む PLA-TCP マトリックス(90 wt%-10 wt%)からなるフィラメントを溶融状態押出し法により作製した。次に、溶融フィラメント法（FFF 法）を用いて 3D ポリマー複合足場を印刷した。SiO2 の添加は PLA-TCP マトリックスの熱特性に影響を与えなかったが、MgO の添加はポリマーの結晶化度と分子量の低下につながった。より高濃度の MgO（5%および 10%）によって引き起こされた速い分解は、複合体の生物学的適合性を付与する酸環境につながった。間葉系幹細胞を用いた生物学的アッセイでは、SiO2 の存在と低濃度の MgO が細胞増殖を促進することが確認された。さらに、生理活性フィラーは骨芽細胞への分化を刺激し、細胞外マトリックスのミネラル化、アルカリホスファターゼ（ALP）活性、骨関連遺伝子の発現を促進した。全体として、PLA-10%TCP-10%SiO2 複合材料は、その強い骨形成挙動により、特に骨組織の再生に最も有望な結果を示した。

(ICACC-P018-2024) 個別化された生物活性ガラス/セラミック骨代替インプラント(ReBone)の改良のためのエンド・ツー・エンドの学際的最適設計：新しい MSC 博士ネットワーク

R.Gabrieli*1; P. Vena2; F. Baino1; B. Obradovic3; L. Rimondini4; D. Ruffoni5 ;
M.シュヴェンテンヴァイン 6; B. ミソフ 7; J. ダンロップ 8; M. スタヌフ 9
1. トリノ工科大学応用科学技術学部（DISAT）、イタリア
2. ミラノ工科大学、化学・材料・化学工学科、生物構造力学研究所（LaBS）、イタリア
3. ベオグラード大学技術冶金学部健康科学科（セルビア
4. イタリア、ピエモンテ・オリエンタル大学
5. リエージュ大学、航空宇宙機械工学科、生体材料力学研究室（

ベルギー
6. リスツ社（オーストリア
7. ルートヴィヒ・ボルツマン骨学研究所、ルートヴィヒ
・ボルツマン研究機構、オーストリア
8. パリ・ロドロン ザルツブルク大学、材料化学・物理学科、モル
フォフィジックス・グループ、オーストリア
9. MedApp S.A, ポーランド
筋骨格系は特に加齢や外傷の影響を受けやすいため、重要なサイズの骨欠損をタイムリーに治療するために骨代替インプラントを必要とする患者には、新たな解決策が求められている。ヨーロッパ・ホライゾン・マリー・スコドフスカ・プログラムの助成を受けた 4 年間の ReBone 博士課程ネットワーク（2024 年～2027 年）は、この多分野にまたがる分野で活躍する新世代の研究者を育成することを目的としています。具体的には、10 名の博士候補生が共同で、新規の個別化セラミックベースの骨代替インプラントを設計・開発するための革新的かつ統合的な方法論を開発します。この野心的な目的を達成するために、材料工学、バイオメカニクス、臨床、メカノバイオロジー、付加製造技術、手術計画シミュレーションのための複合現実モデルなど、多様な分野を網羅するパートナーおよび関連パートナーの欧州ネットワークが構築された。同時に、欠陥の形状や解剖学的位置に関連した最適な生体力学的性能という観点から、インプラントの予後を改善するために、デバイスの構造、材料、製造技術のパラメーターの設計が最適化される。

(ICACC-P019-2024) 骨組織修復に使用可能な生物活性ガラス-グリセロールペースト

R.ガブリエリ*1; D. U. トゥリャガノフ 2; F. バイノ 1
1. トリノ工科大学応用科学技術（DISAT）、イタリア
2. ウズベキスタン、タシケントのトリノ工科大学自然数理学
科
骨修復のための理想的なバイオマテリアルは、治療される骨欠損の解剖学的構造に適合する必要がある。本研究では、臨床試験済みの生体活性ガラス（ BG1d 組成：46.1SiO2 -28.7CaO-8.8MgO-6.2P O25 -5.7CaF2 -4.5Na2 O wt%）と有機担体として使用されるグリセロールをベースとする注入可能なペーストを作製し、再生医療への使用の可能性を検討した。ガラスフリットは、溶融物を冷水に注いだ後、10-15μm 以内の粒子サイズに粉砕し、ふるいにかけて製造した。BG1d-グリセロールペーストは、ガラス粉末とグリセロール（88wt%水溶液）を、ガラスとキャリアの重量比 73/27 で混合して調製した。このペーストは、グリセロールとガラス表面との化学的相互作用により、改善された生物活性を示した。さらに、シリンジから容易に注入可能であることから、調製されたガラスペーストは、2 つの重要な要件、すなわち（i）外科医による使いやすさ、（ii）骨欠損の形状に適合する能力を満たすことが期待される。予備的な invivo 動物実験では、このペーストの骨再生能が実証された。

(ICACC-P020-2024) 拡散制御系におけるフルオラパタイト-ハイドロゲル複合体の形

成

J.Jung*1; S. Yang2
1. 大韓民国・韓国教育大学
2. 韓国国立教育大学化学教育学科、大韓民国

歯や骨は、有機成分と無機成分からなる複合材料であり、特異な構造と優れた性質を有している。特に、生体内で有機高分子と無機物質が相互作用し、温和な環境で形成される生体鉱物にはメソ結晶が頻繁に観察される。様々な生体鉱物の中でも、ヒトの骨や歯を構成するフルオロアパタイトを含むハイドロキシアパタイトは、骨治療や歯科治療への応用が盛んに研究されている。これまでの研究では、骨や歯を模倣するために、可溶性ポリマーや不溶性マトリックスを結晶化プロセスに導入する方法が主に採用されてきた。しかし、生体内と同様のイオン輸送をゆっくりと制御することは、広く達成されていない。本研究では、リン酸イオンとフッ化物イオンを含むハイドロゲルにカルシウムイオンを拡散させ、ハイドロゲルとフルオロアパタイトからなる複合材料を合成した。その結果、ハイドロゲルとフルオロアパタイトからなる複合材料が得られた。イオンのフラックスに応じて、ハイドロゲル中にさまざまな形態のフルオロアパタイトが生成した。興味深いことに、エナメル質の構造に似た、収束した棒状のフルオロアパタイトのメソ結晶が、特定の条件下でのみ形成された。この研究は、バイオセラミックス複合材料における結晶合成の理解に貢献するものであり、歯科分野への応用が期待される。

(ICACC-P076-2024) 新しい抗病原性金属セラミック複合材料コーティング

J.Wojewoda-Budka*1; I. Kwiecien3; A. Bigos1; M. Bugajska1; M. Janusz-Skuza1; R. Major1; M.
Szczerba1; A. Wierzbicka-Miernik1; J. Wiecek1 ;
M.Dyner2、A. Misztela2、D. Veselinov3、H. Skulev3
1. ポーランド科学アカデミー冶金・材料科学研究所（ポーランド
2. CHIRMED-外科・医療機器メーカー、ポーランド
3. ブルガリア科学アカデミー金属科学研究所（ブルガリア

この研究は、治療よりも病気の予防という世界的な流れに沿うような、機能的特性を高めた新しい銅ベースのコ ーティングをデザインし、製造することに専念しています。この研究の主な革新的目標は、新しく製造された銅と銅セラミックの複合コーティングで、病原菌の生存 能力を低下させることです。これらのコーティングは、環境にやさしい試薬を使い、環境にやさしいメッキ技術を比較的簡単に導入することで得られます。銅の抗菌活性はその濃度に大きく依存します。したがって、経済的に実行可能なアプローチは、耐久性があり、耐摩耗性のあるコーティングを採用することである。

(ICACC-P096-2024) ステアリン酸添加リン酸三カルシウム／ポリ乳酸複合スクリューの機械的性質に及ぼす熱間鍛造条件の影響

M.坂口*1; 荒川亮 2; 齋木健 2

1. サレジオ工科大学、機械・電子工学、日本
2. サレジオ工業高等専門学校 生産システム工学科（日本
リン酸三カルシウム(TCP)とポリ乳酸(PLA)の複合材料は、生体吸収性と骨伝導性を有することから、骨折治療に用いられる骨固定デバイスの材料として注目されている。しかし、この TCP/PLA 複合材料は、TCP と PLA の界面に応力が集中するため、機械的特性が低下するという問題があった。本研究では、TCP/PLA 複合骨固定デバイスの成形方法として、TCP 表面の界面処理と熱間鍛造を組み合わせたハイブリッド補強を提案した。そして、ハイブリッド補強 TCP/PLA スクリューの機械的特性に及ぼす鍛造条件の影響について検討した。まず，PLA とステアリン酸で修飾した TCP の複合体を引張方向に引張った。その結果、ステアリン酸による界面処理によって、延伸 TCP/PLA の引張強さと弾性率が増加した。また、この処理により PLA 鎖の配向機能も増加した。次に、TCP/PLA スクリューを熱間鍛造成形した。その結果、このスクリューのせん断強度と配向機能は押出比とともに増加した。

(ICACC-P105-2024) リン酸を含むキャビテーション処理を施したマグネシウム合金の組織に及ぼすアルミニウム含有量の影響

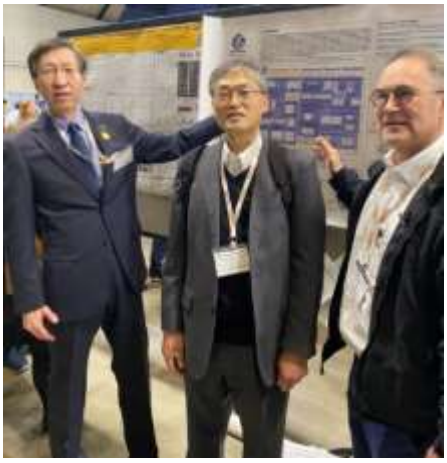
M.井尻*1; 松岡修造 2; 菊地成孔 2; 吉村崇 3
1. 首都大学東京（日本
2. 静岡大学（日本
3. 山陽小野田市立大学（日本
生体吸収性血管ステントは、体内に異物を残さない生体に優しい医療機器として開発された。ステントに使われる材料は生体吸収性のマグネシウムである。しかし、マグネシウムだけでは強度が低いため、アルミニウムを少量添加することで強度の高い合金が開発されている。これらの合金の強度をさらに高めるために表面改質技術が注目されている。本研究では、アルミニウム含有量の多い AZ61 と AZ91 を用い、リン酸を添加したマルチファンクションキャビテーション処理（MCMFC）による処理面の耐食性と疲労特性を調べた。MC-MFC 処理後の表面には、皮膜のクラックや網目状の生成物が観察された。元素マッピングから、この生成物は Mg-Zn-Al 由来の化合物により形成されると考えられた。

６－６　展示会、ポスターセッション

ポスターセッション会場において、ASTM による「先進セラミックスの特性と性能に関する ASTM 国際規格－ASTM は 125 年にわたり、私たちの世界をより良く機能させるために貢献してきた」の発表があった。ASTM C28（先進セラミックス規格委員会）の M.G.Jenkins 委員長と話をした。ファインセラミックス分野の国際標準 ISO/TC206 は欧州と日中韓が中心であり、米国は加盟していない。TC206 設立当初は加盟していたが、現在は ASTM が国際標準と主張している。ポスター資料には、Collaborating International Organization として、ISO TC206 と CEN TC184 の記載があり、Collaborating の意味を質問したところ、monitor だという回答があった。米国の立

場としては、TC206 の規格は見ているが、規格作成は ASTM で充分とのことのようである（収入の 80%が規格売上で占める）。





ポスターセッション会場にて　米国セラミック学会前会長大司様、ASTM C28 委員長 Jenkins 氏と JFCA 竹村

６－７　ICACC2024 のプログラム及びアブストラクト

1 月 28 日午前～2 月 2 日午前まで多くの会場に分かれて、各シンポジウムの学術講演（一般講演、招待講演）が行われたが、誰でも ICACC 2024 の HP から本大会のプログラムとアブストラクトの PDF がダウンロードできる。講演内容の詳細が知りたい方は御参照頂きたい。画像の一部はアメセラの Flicker から引用した。

（リンク先）

講演プログラム

https://ceramics.org/wp-content/uploads/2024/01/1.18.FINAL-ICACC24-meeting-guide.pdf

アブストラクト

https://ceramics.org/wp-content/uploads/2024/01/12.15.ICACC24_Abstracts-3-1.pdf

Flicker

ICACC 2024 | Flickr

６－８　次回の予定

49th ICACC2025 は、2025 年 1 月 26 日（日）～1 月 31 日（金）に例年と同じくデイトナビーチで開催予定。開催案内は以下のリンクを参照頂きたい。

https://ceramics.org/event/49th-international-conference-and-expo-on-advanced-ceramics-and-composites-icacc2025/

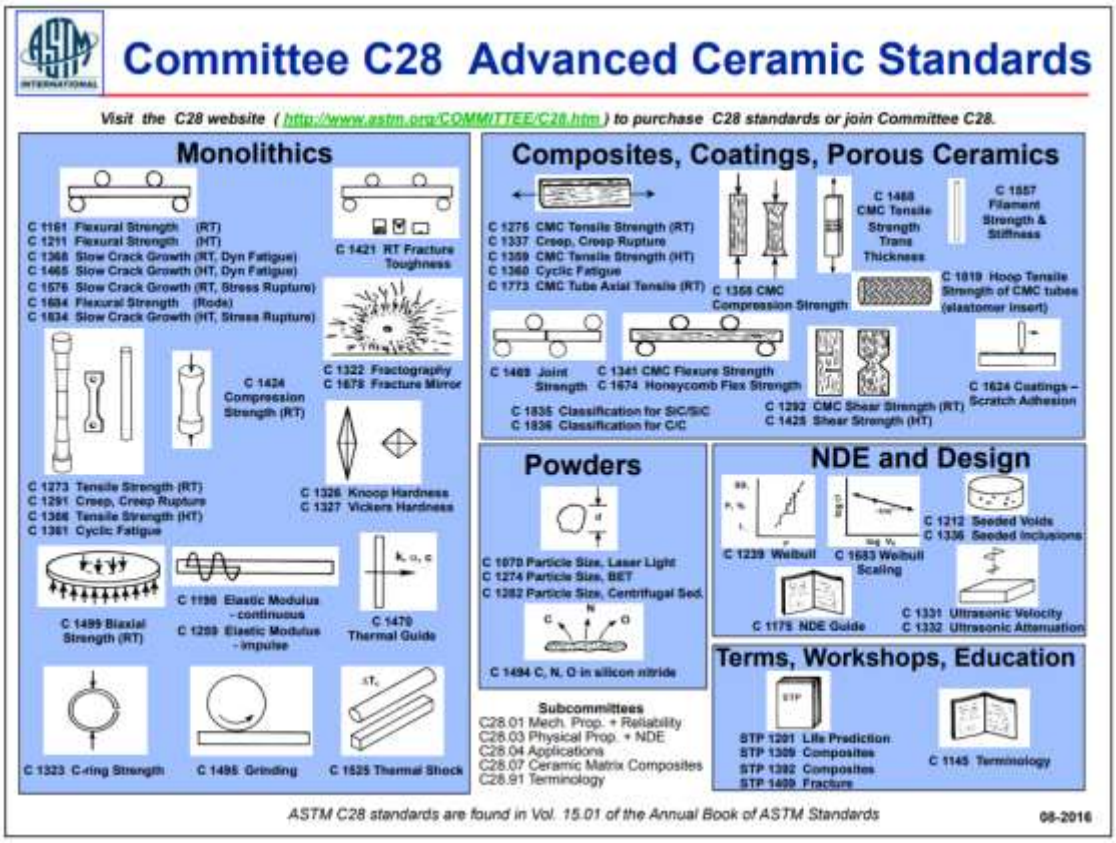
７．所感

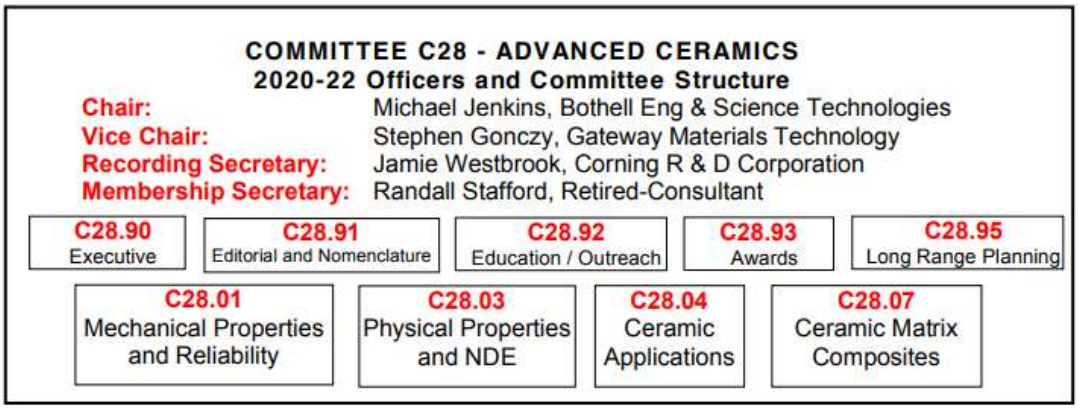
（会議全般）

ICACC 国際会議は、米国セラミック学会のエンジニアリングセラミックス部門主催の国際会議であるが、50 年近い歴史があり、またかなり幅広い分野をカバーしている。25 の分野のシンポジウムとなっている。

学術講演会は、世界各国から参加した研究者が講演し、多くの聴講者が活発な質疑を行っているが、全てのシンポジウムを一人で聴講し掌握するのは難しい。ただ、幅広い分野でセラミックスの今後の技術動向を知ることができる。世界各国から 830 人程度の参加者があり、研究発表や技術動向の調査を行っている。世界から専門家が集まる大変興味深い会議である。
日本からも 100 人以上の参加者がいて、セラミックス分野の先生方、研究者が一同に会し、話ができる良い機会であった。
JFCA からの講演として、セラミックス積層造形の国際標準化がまだほとんど進んでいない状況を説明し、今後の成長が期待できるこの分野において、日本が主導権を持って国際標準化を進めて行きたいことをアピールした。他国の発表においても、米国国立標準技術研究所 NIST がセラミック積層造形体のラウンドロビン試験の途中結果を報告しており、金属や樹脂の積層造形に比べて大幅に遅れていたセラミックスの積層造形が漸く標準化したいというレベルにまで来たことは、昨年までのこの分野の発表内容と比べても大きな進歩と思う。
3D 積層造形の研究発表は、積層造形のシンポジウム以外のセッションにおいても、バイオセラミックス、プロセス、高温セラミックス、SOFC、多孔体セラミックス、構造材料、複合体等のセッションでも多く行われ、非常に関心が高いことがわかった。

（ASTM について）
ASTM C28 委員会（Advanced Ceramics）は、モノリシックおよび複合アドバンストセラミックスの規格を策定している。アドバンスト・セラミックとは、高度に設計された高性能主に非金属の無機セラミック材料のことである。
C28 規格は、バルクおよび構成材料（粉末、繊維、複合材）の試験方法をカバーしています。試験方法の適用範囲は品質管理から設計データ作成まで幅広い。
適用範囲は、ほぼ ISO/TC206（ファインセラミックス）と同じです。
ポスター会場で C28 の資料を入手しました。以下のリンクからその PDF がダウンロードできます。
https://mcsdocs.astm.org/committee-documents/C28_Advanced%20Ceramic%20Sentinel.pdf





８．米国セラミック学会について（The American Ceramic Society）

設立：1898 年
本部所在地：オハイオ州コロンバス市
会長：Dr. Sanjay Mathur （ケルン大学、ドイツ）

● 現在、会員数 11,000 人（研究者、技術者、教育者、学生等）。企業会員 160 社以上
● 会員は 70 カ国以上にまたがる．会員の約 40%は米国以外。

日本約 600 人，ドイツ約 400 人、中国約 400 人等。

● セラミックスは先端・基幹産業のキーマテリアル：

複合材料、エレクトロニクス、バイオ、ガラス、航空宇宙材料、エネルギー・環境材料等の先進材料から耐火物、セメント、陶磁器などのオールドセラミックスに至る広い範囲を扱う.

● Mission：メンバーと社会の利益のために、セラミックと関連材料の研究、理解、使用を促進すること

● 以下の専門的な 11 の Division に分かれている。

Basic Science（基礎科学）
Electronics（電子材料）
Engineering Ceramics（エンジニアリングセラミックス）
Glass & Optical Materials（ガラス・光学材料）
Bio-ceramics（バイオセラミックス）
Manufacturing（製造技術）
Refractory Ceramics（耐火物）
Cements（セメント）
Structural Clay Products（構造粘土製品）
Art, Archaeology & Conservation Science（アート・考古学・保全科学）
Energy Materials and Systems（エネルギー材料及びシステム）

以　上

第 5 章　研究調査

「Additive Manufacturing による生体用構造物の特性評価方法に関する国際標準化調査」において、標準化すべき試験方法や標準化するための課題を明らかにするための、実試料や設備を用いた重要で欠くことが出来ない。このため、Additive Manufacturing (AM 造形) の実証設備による生体用構造物作成への適用の実証試験や、作成された構造物の形状評価のための方法確立や、形状評価に基づく力学強度評価のための研究調査を実施した。研究調査は、国立研究開発法人物質・材料研究機構、東北大学　流体科学研究所、大阪大学にて実施した。各機関での実施内容を以下に示す。

1.国立研究開発法人物質・材料研究機構(NIMS)における調査研究

研究の目的

3 次元プリンタにより作製する well-designed 多孔質骨補填材料の構造正確性・機械的特性予測に関して、標準化すべき試験方法や標準化するための課題を明らかにするための調査研究を実施した。具体的には、 3 次元プリンタにより微構造制御した骨補填材の作製が可能であるか、また得られた試料を μ CT 撮像し、設計データとの差違がどれほど存在するかについての検証を実施した。

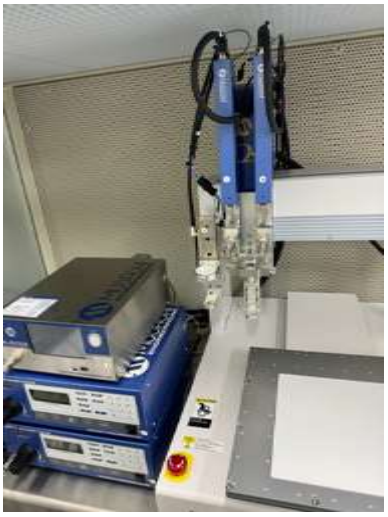
3 次元プリンタとして、武蔵エンジニアリングのディスペンサーセット一式を導入した。納入が 12 月末のであったため、本年度はアルギン酸ナトリウムと水酸アパタイト粉末の混合スラリーによる 3 次元構造体作製条件の設定を試みた

実施内容

3 次元プリンタとして、武蔵エンジニアリングのディスペンサーセット一式を導入した。納入が 12 月末のであったため、本年度はアルギン酸ナトリウムと水酸アパタイト粉末の混合スラリーによる 3 次元構造体作製条件の設定を実施した。

導入装置はシリンジ型インジェクタの取り付けが可能なヘッドを持ち、テストプリントの後、細胞の播種などにも使用する計画である 1 液用ヘッドの他、2 液混合が可能な





2 液用ヘッドを選択することが可能である。後者ヘッドの使用によって、骨補填材料を含むスラリーと硬化剤を直前に混ぜ合わせることが可能となり、硬化時間に左右されない 3 次元構造の構築が可能である。

3 次元構造体作製条件設定のための調査研究に使用した材料の概略を以下に示す。

アルギン酸ナトリウム（アルジネート、Alg）
低粘度（30−cp）
水酸アパタイト粉末（HAp）
自家合成しスプレードライした未焜焼粉末およびその 800℃焜焼粉末
粒径 100 μm 以下
塩化カルシウム（試薬特級）

次に、格子状 3 次元構造体造形のために策定したプロトコルを以下に示す。本プロトコルにより下に示すテスト用多孔体の設計図面に示す 20 × 20 × 4.5 mm3（Z 軸移動の調整無しの場合）の格子状気孔を持った 3 次元多孔体が作製できることになる。本図は a: Z 軸方向から見た図、b: 斜めから見た図、の 2 種を示した。いずれも描線の太さは実際のプリントの太さとは異なっている。なお、Z 軸方向の移動は押出スラリーの径を考えて調整すべき値であり、Subroutine 1 の Y 軸移動距離や Subroutine 2 の X 軸移動距離も同様である。

Main routine

1. 構造体作成開始位置への移動
2. スラリーの押出開始
3. Subroutine 1（X 軸方向）
4. Z 軸方向へ-0.75 mm 移動（上に上げる）
5. Subroutine 2（Y 軸方向）
6. Z 軸方向へ-0.75 mm 移動（上に上げる）
7. 3 から 6 を 3 回繰り返す
8. 押出終了

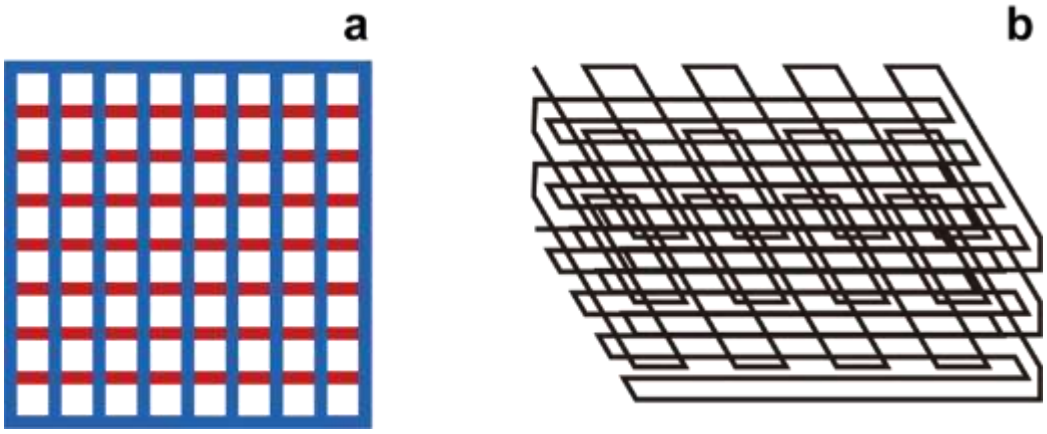
Subroutine 1

1. X 軸方向へ 20 mm 移動
2. Y 軸方向へ 2.5 mm 移動
3. X 軸方向へ-20 mm 移動
4. Y 軸方向へ 2.5 mm 移動
5. 1 から 4 を 4 回繰り返す
6. X 軸方向へ 20 mm 移動

Subroutine 2

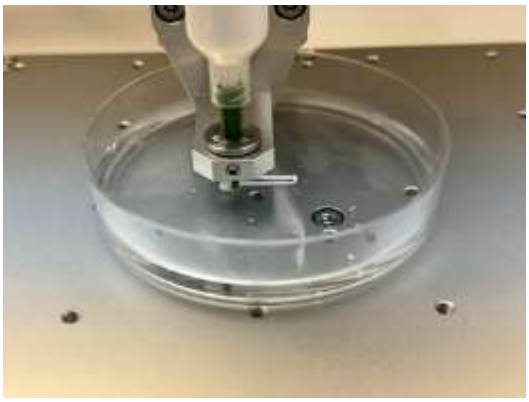
1. Y 軸方向へ-20 mm 移動
2. X 軸方向へ-2.5 mm 移動
3. Y 軸方向へ 20 mm 移動

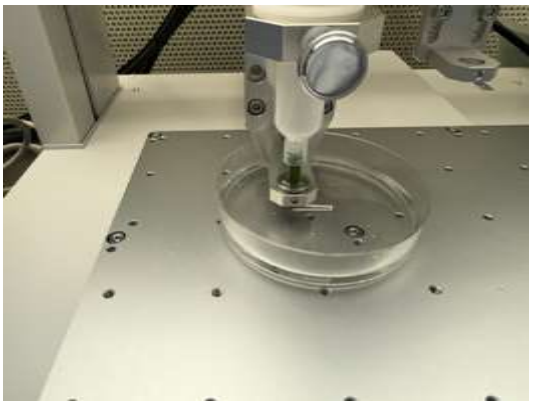
4. X 軸方向へ-2.5 mm 移動
5. 1 から 4 を 4 回繰り返す
6. Y 軸方向へ-20 mm 移動



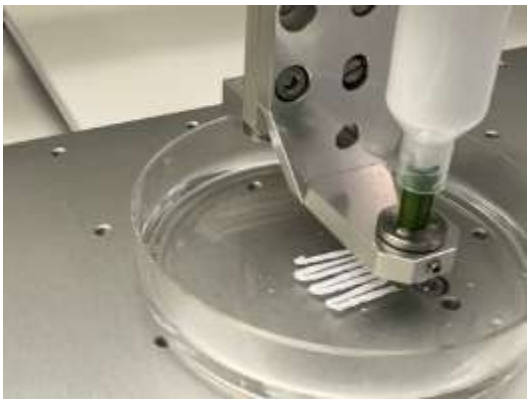
10 %アルジネート水溶液を用いた系での 3 次元構造体作製方法と結果を示す。
まず、10 %のアルジネート水溶液を調整し、25 mL コニカルチューブに 10 mL の 10 %アルジネート水溶液を分注し、それぞれ 5 g の未焼焼および焼焼 HAp 粉末を量り取った。
その結果、いずれの条件でも均一なスラリーが得られなかった。これは、10 %のアルジネート水溶液は粘性が高いことによる影響が大きく、更にスプレードライ粒子で一般的に存在する凹みのような気孔に、高い粘性を持つアルジネート水溶液が充分に含浸されなかったことなどが影響していると考えられた。そこで、さらに純水を少量ずつ加えていき、10 mL を加えたところで焼焼 HAp でスラリーが作製できた。結果として、アルジネート水溶液の濃度は約 5 %となった。一方、かさ密度の高い未焼焼 HAp ではこの条件でもスラリーが得られなかった。
これを用いて 3 次元構造体を作製しようと試みたが、スラリーの均一性が充分でないことから 1 層目のプリントすら成功しなかった。
次に、1 %アルジネート水溶液での 3 次元構造体作製方法と結果を示す。
今回の HAp 粉末では 10 %アルジネート水溶液では濃すぎる可能性が高いため、一度より希薄な水溶液を用いることとした。これは、粘性が高く構造体の安定性が見込める濃厚水溶液を再度使用するため、希薄水溶液で充分なノウハウが得ることも、目的の一つとしている。
今回は焼焼 HAp 粉末のみを用い、粉液（P/L）比（g/mL）を表 1 の通り 0.5、1.0、2.0 とした。
25 mL のコニカルチューブにそれぞれ量り取ったアルジネート水溶液に 5 g の HAp 粉末を追加し、アスピレータで真空引きすることでアルジネート水溶液の粉末への含浸を試みた。
その結果、この粉末では P/L 比が 0.5 では緩いスラリーが得られたが、1.0 以上ではスラリーとならなかった。そこで、P/L 比 1 のチューブに 2 mL のアルジネート水溶液を

追加したところ、スラリーが得られた（P/L 比約 0.7）。
この 2 種を用いて 3 次元構造体の構築を行ったところ、滅菌ずみポリスチレン製細胞培養皿上ではその疎水性が高く、スラリーの粘度が表面張力に抗するに充分でなかったため、培養皿上でスラリーがある程度大きな水たまりのようにまとまっていってしまう現象が認められた。
そこで、予め培養皿に 0.1 N の塩化カルシウム溶液を添加し、スラリーが押し出されると共にアルジネートのゲル化を行い、形状を保つことを試みた。この時、スラリーを押出機先端より垂らすように造形していくとゲルの密度が水と大きく変わらないため、培養皿底面に接しないまま押出機先端に引っ張られていき、構造体の作製ができない。そこで培養皿底面にスラリーを塗布するように設定したところ、下図のように 1 層目がプリント可能であることが分かった。



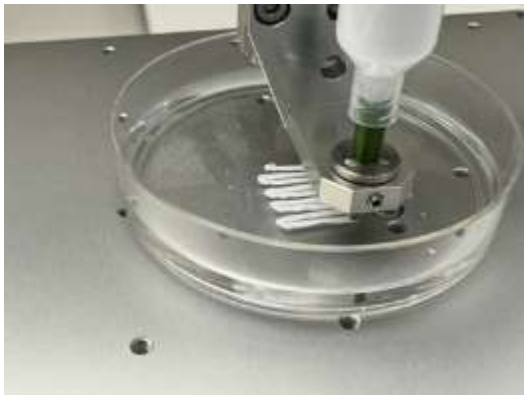
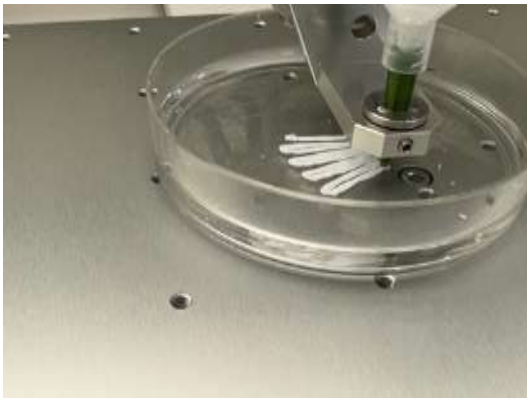


しかし、続けて 2 槽目に移行しようとした場合、図 5 のように 1 層目が引きずられてしまうため、この条件では 3 次元構造体を作製することができなかった。より具体的には、1 層目のプリント成功の後、ヘッドを外すと基板から剥がれて浮いてしまう例が観察された。





また、1 層目プリントの後 0.75 mm 引き上げて 2 層目のプリントに入ろうとするが、1 層目が基板から剥がれ引きずられてしまう例が観察されている。

これらについては、1 層目がプリントできていることから、2 層目以降も基板やスラリー、AM プログラムの最適化で 3 次元構造体の作製は可能であるとの見通しである。

考察

今回実施した調査研究において 2 層目の積層や、1 層目の固定に課題があることが明らかになった。本現象の主な要因として、基板とスラリーの親和性が低かったことによると考えられる。今回実施試験では、本技術の最終的な適用目的としてとして細胞培養試験やインプラント材料として用いることを想定して、最も簡便かつ確実に滅菌されているポリスチレン製細胞培養皿を用いた。この培養皿の表面は親水性が比較的低いため、水ベースのスラリーをはじきやすくなっている。そこで、現在検討中の基板として、滅菌可能なものとしてガラス製シャーレ（培養皿）や多孔質セラミックス吸収板など、より親水性が高いものや余剰の水分を吸収する素材などを用いることで、3 次元構造体を作成可能だと考える。実際、成形後に焼成するような素材を用いる系では基板の選択肢が広いため、セラミックス三次元構造体の作製に成功し、一部は市販もされていることなどを参考として、生体用材料に対する基板の最適化によって、3 次元構造体の作製が可能であるとの見通しが得られた。
なお、本報告書の後も、基板及びスラリーの最適化の検討を継続して実施し、AM による 3 次元構造制御骨補填材に関する国際標準の策定を目指して研究を推進していく。

2.東北大学　流体科学研究所における調査研究

研究の目的

疾患モデルの形状構築には，3 次元プリンタが多く用いられるが、医療機器はモデルに接している状態で使用されるため、モデルの粘弾性や表面形状(摩擦)が医療機器の性能に影響を与えるにもかかわらず、構築したモデルの粘弾性や表面形状(摩擦)についての検証法の規格化がない。3 次元構造物の表面性状および粘弾性の評価方法に関する国際標準化(血管等管状構造体の変形および表面性状の国際標準化)において、CT 像などを利用して得られた構造の正確さ、形状評価、力学的評価、3 次元構造物の表面性状、及び粘弾性の評価方法を確立するための、検討と課題を明らかにするための研究調査を

実施した。
特に、近年、血管内にガイドワイヤやカテーテルなどの治療デバイスを挿入し、直接患部を治療する血管内治療が盛んに行われている。モデルとしては、ASTMF2394 の形状が用いられることがある。この形状と表面物性(ここでは、主に摩擦力とする)について、本分野が適用すされる疾患の動向や血管内治療に関する実態調査と評価方法確立のための調査研究を行った。
具体的な調査研究は以下の観点から実施する。

- 多孔質骨補填材料に使用される水酸アパタイト／コラーゲン骨類似ナノ複合体（HAp/Col）を利用し、Extrusion 式の 3 次元プリンタで設計された気孔構造を構築し、得られた材料の CT 像などを利用して得られた構造の正確さを測定あるいは検定する方法を確立するための検討が必要。
- 複雑な形状を有する生体内へセラミックス製人工骨を埋め込むには、造形された人工骨の寸法・形状が設計時と一致する必要があるが、ファインセラミックスの AM 造形では造形・焼結による収縮が問題になるため、形状評価と力学的評価方法を確立するための検討が必要。
- 疾患モデルの形状構築には，3 次元プリンタが多く用いられるが、医療機器はモデルに接している状態で使用されるため、モデルの粘弾性や表面形状(摩擦)が医療機器の性能に影響を与えるにもかかわらず、構築したモデルの粘弾性や表面形状(摩擦)についての検証法の規格化がない。3 次元構造物の表面性状および粘弾性の評価方法を確立するための検討が必要。

実態調査

血管内治療の対象となる疾患についての実態調査を行った。2021 年から 2022 年の我が国における死因順位別の死亡数を表に示す。2021 年、2022 年ともに総数の確定数である。2021 年、2022 年ともに死因において脳血管疾患は第 4 位となっており、がんや心疾患、老衰とともに死因の上位を占めている。

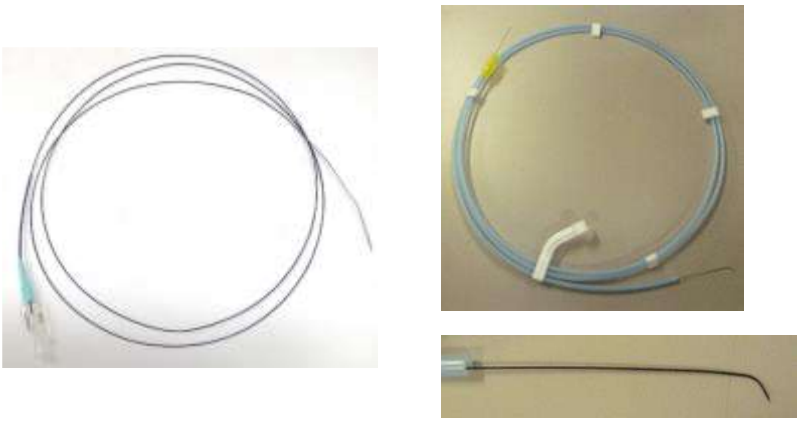
表　日本の死亡原因

Rank	2022		2021	
	Cause of death	Deaths	Cause of death	Deaths
1	Malignant neoplasms	385 797	Malignant neoplasms	381 505
2	Heart disease	232 964	Heart disease	214 710
3	Decrepitude	179 529	Decrepitude	152 027
4	Cerebrovascular disease	107 481	Cerebrovascular disease	104 595

脳血管疾患は、出血性脳血管障害と虚血性脳血管障害に大別される。出血性脳血管障害は、脳血管にできた動脈瘤という風船状のコブが破裂することが原因である。動脈瘤の破裂と出血により、血腫と呼ばれる血の塊が脳を圧迫し、脳圧の亢進・組織の破壊が生じる。代表的な例としては、「くも膜下出血」が挙げられる。虚血性脳血管障害は、血管の閉塞や狭窄により血流が悪くなり、組織の破壊が生じる。こちらの代表的な例としては「脳梗塞」が挙げられる。
出血性脳血管障害の代表例である、くも膜下出血は、発症 1 ヶ月の死亡率が約 30%であり、急性期死亡率が非常に高い特徴がある。また血液や血腫が脳を圧迫し、生存した場合でも四肢の麻痺や言語障害などの深刻な後遺症が残る可能性が高く、再発の可能性もある。このような脳血管疾患に対しておこなわれるのが外科的治療と血管内治療である。また虚血性脳血管障害に対しては、抗血栓薬や血管拡張薬を用いた薬剤治療もおこなわれているが、定期的な薬剤投与が必要となり、急性期の患者には根本的な治療とならず、外科的な治療が必要となる。
出血性脳血管障害の代表例である「くも膜下出血」を引き起こす脳動脈瘤に対する外科手術では、クリッピング手術がある。この手術は、血管に発生した動脈瘤の根元をクリップで挟むことで、瘤への血液の流入を遮断し、破裂の防止や瘤の剥離、血管の再構築を行うものである。
虚血性脳血管障害に対する外科手術では、バイパス手術がある。バイパス手術は、狭窄・閉塞した血管の上流側と下流側を人工血管や別部位(頭皮や前腕)から摘出した血管で繋ぎ、迂回路(バイパス)となる血流ルートを構築する。
これらの外科手術は、医師が顕微鏡を用いて肉眼で確認しながらの施術が可能であるという大きな長所があり、半世紀以上の歴史を持つ経験的、技術的に熟れた手術法である。一方、外科手術は、患部を体外から直接確認しながら治療をおこなうため、頭部を大きく切開をする必要がある。そのため術中・術後ともに患者の身体への負担が大きいという短所がある。特に近年、増加傾向にある高齢の患者には体力的な問題から手術そのものが致命的な負担となる可能性がある。そこで注目を集めているのは、低侵襲治療(患者の身体的負担をできる限り最小限に抑えつつ、高い治療効果を期待できる治療)の一つである血管内治療である。

次に血管内治療の方法や器具類についての調査を行った。
血管内治療は、図に示すカテーテルという細長く柔らかい管と、ガイドワイヤという形状記憶合金などの金属製のワイヤを用いる。大腿部もしくは腕の動脈を通して医療器具を患部まで挿入し、血管内から治療するものである。最初に、ガイドワイヤを患部まで挿入し、ガイドワイヤをガイドにしてカテーテルを患部まで誘導する。その後、ガイドワイヤを抜き取り、カテーテルを通して、種々の器具・薬剤を用いて患部を治療する。

デリバリーシステムに取り付けられたバルーン拡張型血管ステントの固定を測定するための標準ガイドである ASTM F 2394 (Standard Guide for Measuring Securement of



カテーテル（右）とガイドワイヤ（左）

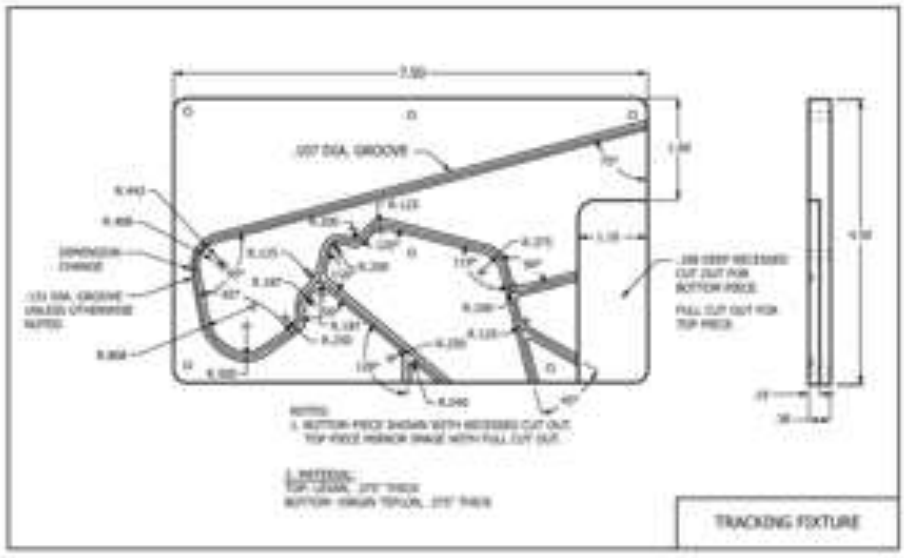


図　ASTM F2394　形状概略図

Balloon Expandable Vascular Stent Mounted on Delivery System)　の形状概略を図に示す。

本件においては、以下の規定がなされている。

1. Significance and Use (意義と用途): 「血管内ステントのバルーンへの固定は、ステントを治療部位へ、あるいは治療部位から安全に送達するための重要なパラメータである。本ガイドは、研究者およびメーカーが、ステントの確実性を測定するための試験前処置、試験および試験エンドポイントを開発・選択する際に使用することを目的としている。
2. 臨床シナリオ
3. 試験法に関する考察
4. 装置例

このうち、ステント固定に対する評価試験のエンドポイントでは、

1. 初期変位力
2. 初期ピーク変位力

3. 限界距離 ピーク変位力
4. ピークずれ力

を例に挙げている。

さらに、装置例として上の形状概略図があげられているが、以下の但し書きが記載されている。「このモデルは、中程度の難易度の曲がりくねりを伴う冠状血管を 2 次元平面でシミュレートしていますが、シミュレートされた病変は存在しないことに注意してください。」

この形状が持つ問題点についてヒアリング調査を実施した。

ヒアリング実施日時：2024 年 1 月 23 日、カテーテル・ガイドワイヤメーカー

- モデルの表面物性の規定について：評価・プロモーション、安全性、性能の評価に使えるため、重要である。
- 医療機器の評価項目：摩擦力に起因する評価項目がある。
- ASTM　F2394 では、不自然な壊れ方をすることがある。

総括すると、モデルの表面物性を規定することで、モデルがカテーテル・ガイドワイヤの安全性、性能評価に使用できる可能性がある。

実施内容

F2394 の形状を構築し、モデルへのガイドワイヤ挿入およびその時の摩擦力測定を行った。ガイドワイヤを血管モデルに水平方向と斜め方向に挿入する装置を作製した。測定の再現性が低いことなどの問題点を解消するため、ワイヤを血管実体モデルに対して、鉛直方向に挿入する下図の実験装置を開発した。トルクデバイスでガイドワイヤを把持し、自動ステージで挿入、回転を行った。ガイドワイヤと血管モデルとの接触力（挿入力）、ねじりモーメントは、回転ステージに固定した力覚センサを用いて測定した。挿入力はガイドワイヤ挿入方向を正とした。

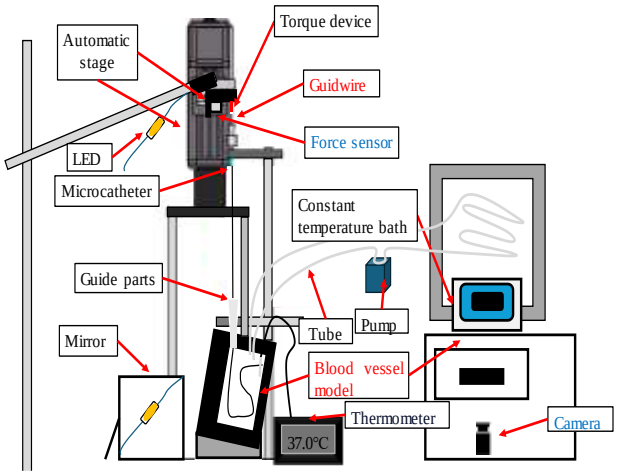


図　構築したガイドワイヤ挿入装置

また、本研究では、下図のように、ASTM F2394-07(1)を参考に実体血管モデルを作製

した。3D プリンタで土台を作製し、溝に透明なポリウレタンチューブ（内径：4 mm）を通した。モデル内は蒸留水で満たした。製作した装置では、実体血管モデルの温度を目標である 37±2℃に制御できることを確認した。

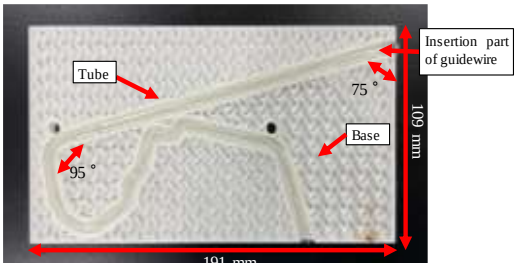


図 F2394 に記載される形状のモデルの再現(ポリウレタン)

ガイドワイヤ挿入速度、ねじり速度は、それぞれ、1。0 mm/s、45°/s とし、最初の屈曲部から合計 150 mm 挿入した。Motion 1（一定速度で挿入）と、Motion 2（屈曲部で一時停止してねじってから再挿入）、Motion 3（屈曲部で挿入しながらねじって再挿入）を実施した。ガイドワイヤを挿入する力、ねじりモーメントを測定し、比較した。ガイドワイヤの挙動はカメラで撮影した。各条件で 3 回ずつ実験を行った。
ワイヤ根元に加えたねじり動作によって、ワイヤ先端の向きが変わることをカメラで確認した。以下の図にそれぞれの条件のガイドワイヤと血管モデルの間の接触力を示す。
接触力は、血管とワイヤの摩擦により増加した。また、ガイドワイヤに加えた動きに応じて、特徴的な挙動になった。総入力の時系列変化 (b)、 (c)では、回転ステージでガイドワイヤをねじったとき（110.5～116.5 s）、力が大きく変化した。また、ガイドワイヤをねじる際、Motion 3 の方が Motion 2 よりも増減の速度が小さくなった。これは、Motion 3 のねじり動作の際に同時に加えた挿入動作が、先端に伝わりやすく、Motion 2 と異なり、先端が血管モデルに対して動いているためと考えられる。すなわち、ワイヤと血管モデル間は摩擦力の小さい動摩擦状態であり、先端があまり拘束されることなく、ゆっくりとねじられたと考えられる。
また、ねじり動作を加えなかった Motion 1 と異なり、Motion 2、3 では、ねじり動作時にねじりモーメントを検出した。
以上、ガイドワイヤと血管モデルの間の接触力とねじりモーメント評価の結果、製作した装置では、実体血管モデルの温度を目標である 37±2℃に制御できることを確認した。また、ワイヤの挿入条件の違いによって、ワイヤの挿入力、ねじりモーメントに差が生じることを確認した。

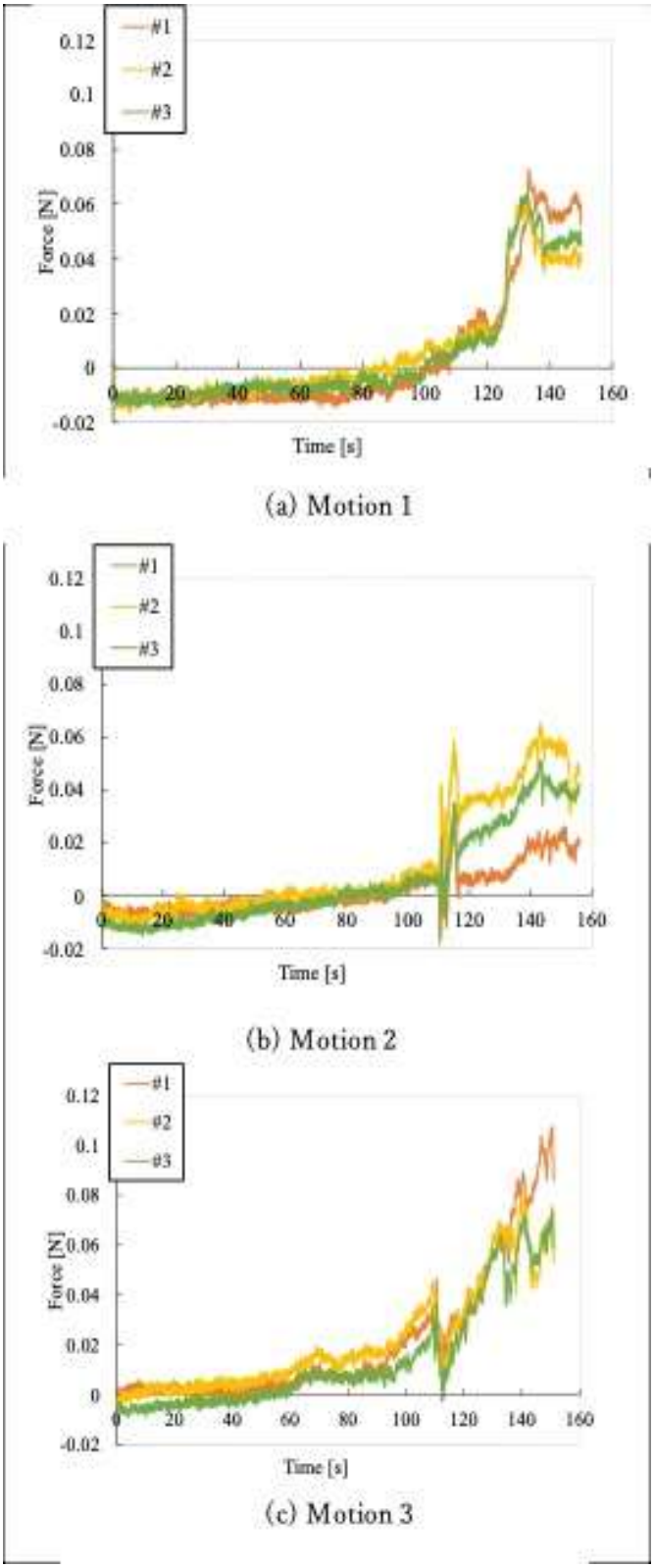


図　ガイドワイヤ挿入に対する挿入力の時系列変化

PVA-H は、ポリウレタンと比べ、摩擦係数が低いとされる。また本モデルは血管側に歪みセンサが付着しており、血管壁にかかる力を計測することが可能である。下図に F2394 モデルを示す。併せて 3 次元形状の重要性を考慮するための、3 次元歪みモデルを示す。



図　ASTM F2394 PVA-H モデル



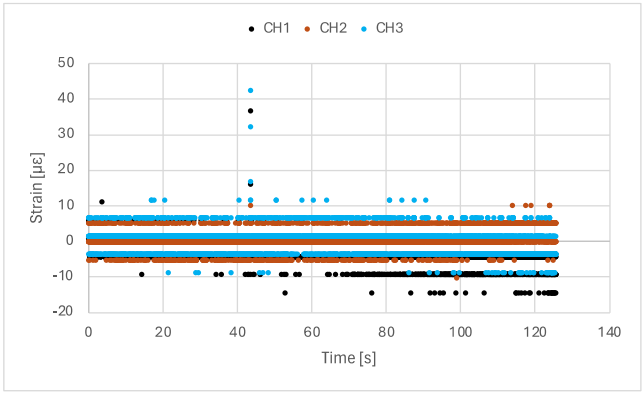
3 次元形状を付与した歪みモデル

以下の図にモデルにおけるガイドワイヤの時系列的挙動と、得られた歪みの時系列の値をそれぞれ示す。センサの 1、2、3 が主に反応した。特に、時系列的に、CH2 が最も速く反応を始めており、また、CH1 はマイナス（つまり、引っ張られている）歪み状態を示している。このことから、CH1 にはガイドワイヤが接触をしておらず、ガイドワイヤがディスタール（遠位）部で血管壁に接触し、引きずられたものと考えられる。この CH1 の値の大きさに関しては、低い方が良いと考えられる。しかし、この値を CH1 周辺の強度と考えた場合、血管壁外周と血管壁自身との接着と外周の力学的強度にも関係してくるので、今後吟味する必要があると考えられ測定を継続して行っていく。

策定する規格について、以下のことを検討した。

1. 評価するのは追従性とする
2. 形状、材料特性、他に試験時に留意する特徴、およびその特徴の確認方法、の記載が最低限必要
3. 想定されるモデルの使用方法は、ガイドワイヤの評価に使われるとする
4. 血管モデルは使用者が定めればよい（任意形状）
5. 標準ガイドワイヤ案：仕様書で定義されるとしてはどうか（添付文書から取れる情報、全長、RadioPaque の長さ、径、材質、先端形状、および実測した弾性率などの機械的特性値から設定するそれぞれの特性を幅記載した表で、現在よく使われている製品が含まれるようになっていると良い）
6. 仕様書にしたがって複数選定することでよい
7. 摩擦は追従性を左右する要素となるが特出しにするのは難しいかもしれない
8. 評価の際ガイドワイヤを駆動するのはロボット（人でない再現性が高い方法なら良い）とするのでよい
9. 送る速度、回転させる速度は、臨床を模倣するのがよいか ASTM に依ることにす

るのか議論が必要



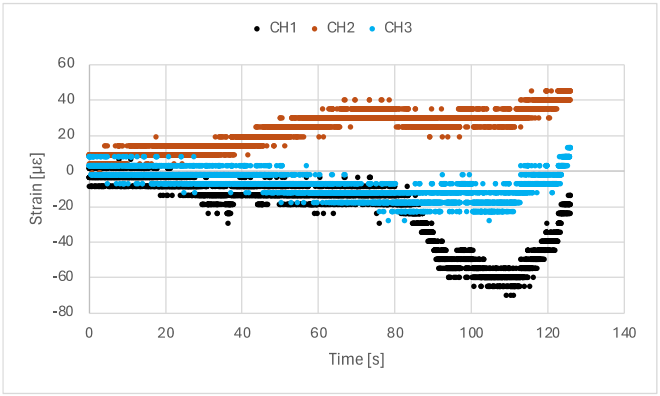


図 9　PVA-H モデルで測定された各チャネルの時系列変化

本件に関連して、指導医から、カテーテルに求められる性能について、ヒアリング調査を行った。ヒアリング対象の専門医は、海外含め 3 人である。以下、結果をまとめる。

1. 血管周りの硬さが重要。柔らかすぎると、押してもカテーテル先端は動かなくなる。（下図）
2. 分岐に入っていった場合、滑りが極端に悪いもしくは良い場合、カテーテル先端が動かなくなる。（併せて下図に示す）→カテーテルが伸びている方向と、進めたい方向が違う場合が多い。



図　血管周りが柔らかい場合

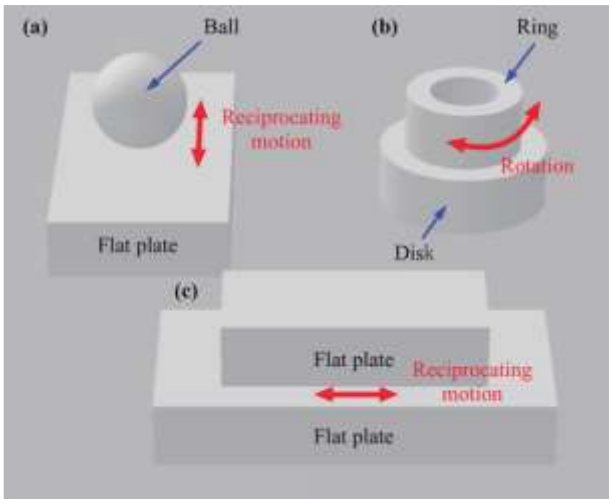


図　分岐部における先端方向と押す方向の違い

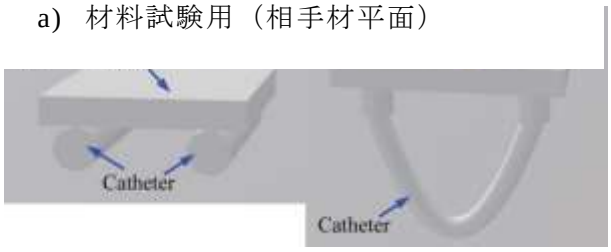
3. カテーテル手元での回転・変位とカテーテル先端の回転・変位が追従しているかどうかを見ることができるモデルの重要性。
4. 3のうち、カテーテルの接触部が変化していく

考察

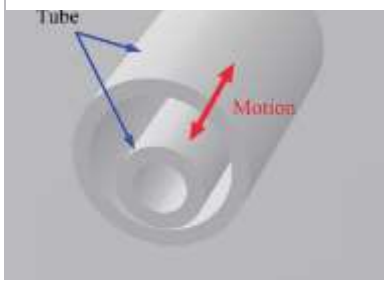
これまでに、表面摩擦力もしくは摩擦係数そのものを測定する方法として高嶋らがまとめた論文がある(K。 Takashima、 et al。 “M ethods for Evaluating Friction between Intravascular Device and Vascular Biomodel”、 Tribology Online、 Vol。 19、 No。 1。 2024、 pp。 42-54)。当該論文で紹介された方法の一覧を下図に示す。



a) 材料試験用（相手材平面）



b) カテーテル試験用（相手材平面）



c）カテーテル試験用（相手材曲

図　これまでに考案されてきた摩擦試験法

ここから c）を除いて、相手材は主に平面である。また、カテーテルが進む方向と摩擦試験を行う方向は全て同一方向である。しかしながら、現場の医師らが摩擦と称してカテーテルの性能を伝えるのは、上述の通り、常にカテーテルが進む方向と摩擦させたい方向は必ずしも一致していない。さらに、下図に例示するように、脳血管においては蛇行が激しいため、この方向性はほぼ一致しないことがわかる。このことから、新たな形状を ISO として提案し、カテーテルの性能を評価する規格を作ることは不可欠である。

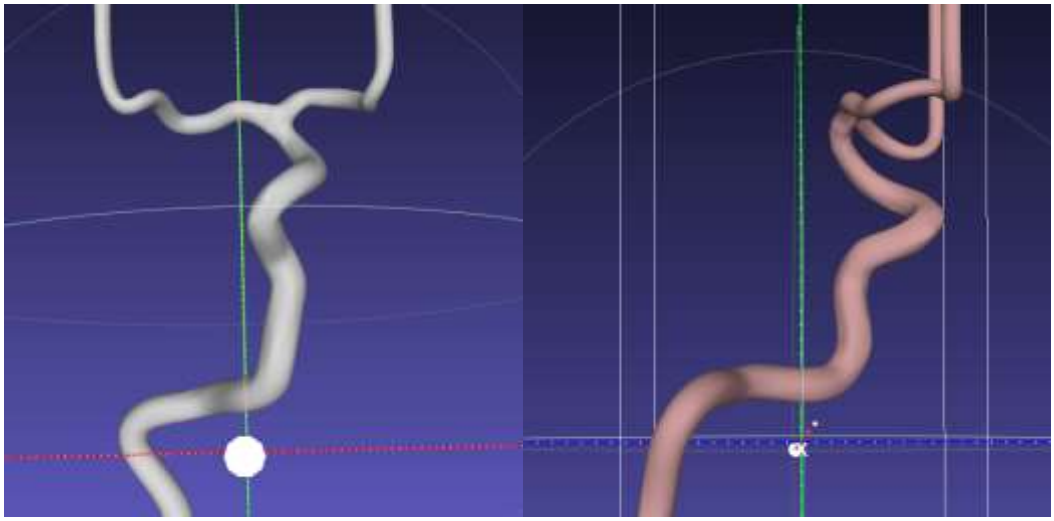


図　脳血管形状

また、医師らがカテーテル性能として重要視しているのは、カテーテルを押す、引く、廻す動作を行った時のカテーテル先端の追従性（手元操作とカテーテルやガイドワイヤの先端の挙動に時間的遅れがないこと）である。この追従性は、ASTM　F2394 では触れて以内事項である。さらに、追従性に関して ASTMF2394 の形状ではほぼ遅れが生じることはなかったことが測定 1、2 より明らかになった。
以上のことから、追従性の測定法を規格化すること、このために、形状と物性の要点をまとめることが今後おこなうことと言える。
本事業を通して、モデル表面形状および深部の硬さが医療機器性能評価に、非常に高く寄与していることが分かった。このことより、これらを測定し規定することで、医療機器の性能を客観的に測定できる。そして、我が国の医療機器のポテンシャルを示し、海外への販路拡大に繋がると考える。

3.大阪大学における調査研究

研究の目的

AM 造形セラミックス人工骨の形状評価と力学強度評価に関する国際標準化において、標準化すべき試験方法や標準化するための課題を明らかにするための調査研究を実施した。

生体用構造物の治療への適用のためには、その構造部もつ力学強度等の性能特性を明らかにし、治療への適用にあたって必要とする性能を満たすかを予め見積もることが求められる。そのための調査研究として、多孔体バイオセラミックスの圧縮・ねじり破壊シミュレーションを実施した。
多孔質アパタイトセラミックスは骨折時や骨切り後の生体骨の修復材料として、国内の臨床現場でひろく利用されている。多孔質アパタイトセラミックス内の孔の中に骨細胞が入り込んで増殖し、徐々に人工骨が天然骨に置き換わるあいだ、バイオセラミックスは、日常生活における複雑な力学的負荷、すなわち曲げやせん断、ねじりなどが複合して繰り返される荷重に対して、高い耐久性を有する必要がある。
しかし、生体材料向けの多孔質アパタイトセラミックスを力学試験に供することは容易ではない。下図に骨補填材として市販されている多孔質セラミックス材を用いて圧縮荷重試験を行った際の様子を示す。実機試験では同じ製品でも破壊様式が一定しない。同一の試料を５つ用意した場合でも、破壊時の様子はそれぞれ異なる。セラミックスは脆性材であり、また試料内の微細多孔体形状が異なるためと考えられる。
このような力学実機試験の困難さを克服するためには、有限要素解析などを用いたコンピュータシミュレーションが有効である。シミュレーションでは理想的な材料固定や平衡状態を仮定することができ、また数値的な再現性も確保できる。すでに ASTM F04 でも股関節および膝関節の金属ステムの力学強度評価について有限要素解析の有効性を検討しているが、材料破壊についてはまだ行われていない。
本稿では多孔性バイオセラミックスの力学強度評価について、圧縮とねじりによる破壊を考慮したシミュレーションをおこない、その有効性を調査した。

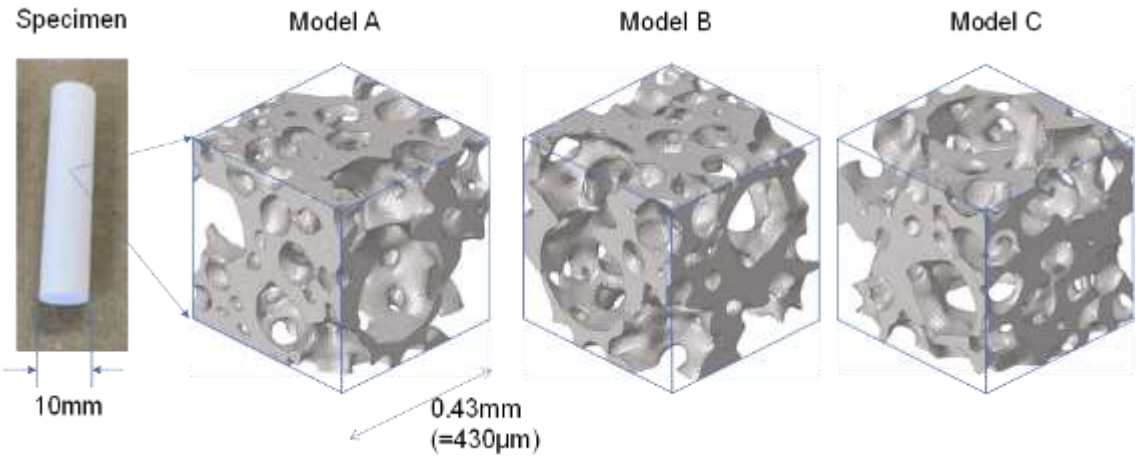




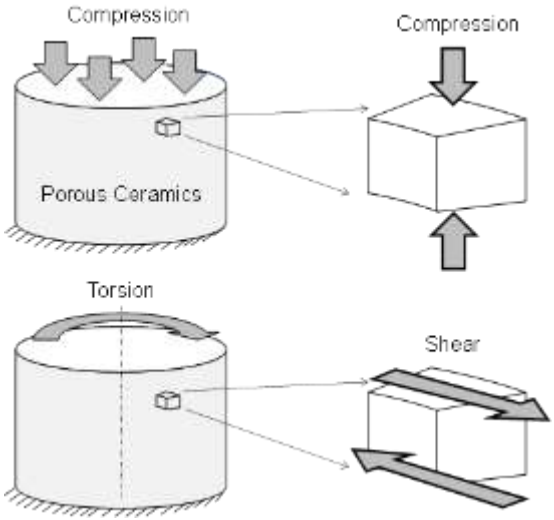


実施内容

骨補填材として市販されている多孔性セラミックス試験片について、マイクロ CT により内部構造を計測し、1 辺 0.43mm(=430μm)微小領域の３D 有限要素モデルを作成した。図 2 に作成した３D モデルを示す。不均等に空孔が存在していることがわかる。
本研究では 3 種のモデルを作成し、それぞれに圧縮荷重およびねじり荷重を与えることにした。本研究で使用したマイクロ CT 有限要素モデルを下図に示す。

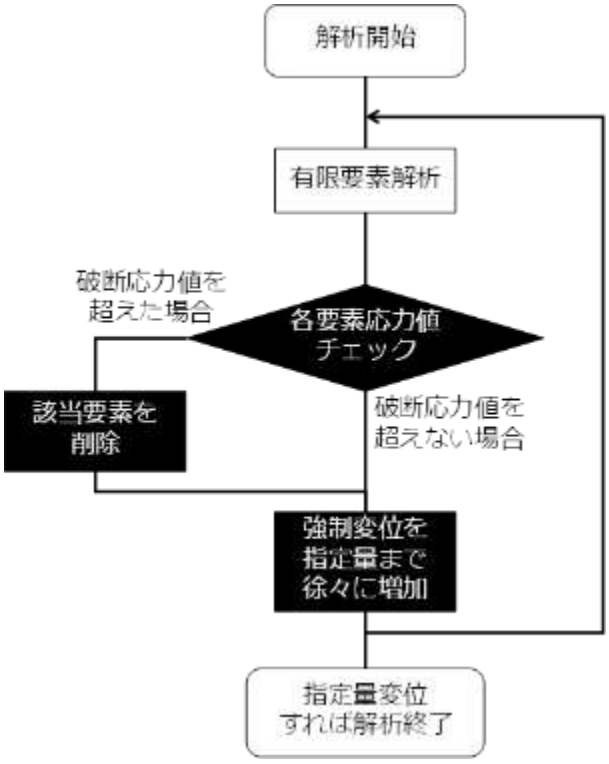


本研究では、圧縮荷重とねじり荷重のそれぞれを負荷することにした。骨補填材であるセラミックス材料に圧縮負荷を与えるとき、微小構造にも同様に圧縮力が加わる。一方、骨補填材にねじり負荷を与えた際、微小構造内にはねじり回転中心がなく、せん断力が加わると考えられる。微小モデルにおける圧縮負荷とねじり負荷の考え方を占めず概念図を下に示す。

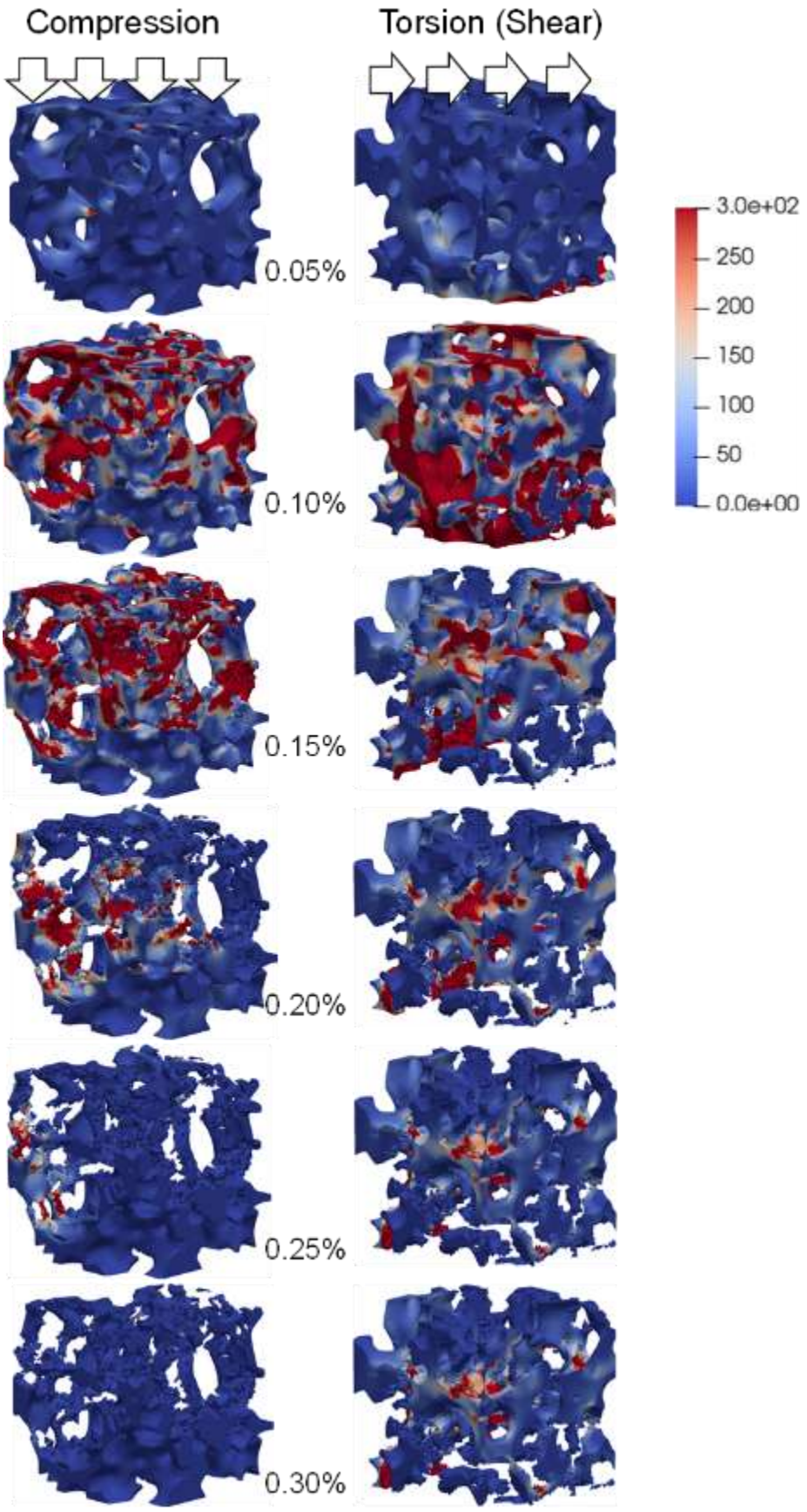


このため有限要素モデルに加える負荷は、圧縮試験を模擬する際には圧縮荷重を、ねじり試験を模擬する際にはせん断力を加えることとし、モデル上面に強制変位を与えることとした。セラミックスは脆性材料であるため、本シミュレーションで負荷する強制変位量は最大 0.3%とした。

また、先に示した圧縮試験での資料の破壊様式からも判るように、脆性材料であるバイオセラミックスでは小さいひずみ量でも破壊が発生する。このためシミュレーションでは、応力が一定値を超えた有限要素は破壊されたと仮定して消去されるよう、有限要素解析プロセスに処理を追加した。プロセスフローチャートを下図に示す。このような手法は、骨との接触部分に表面処理を施した歯科インプラントの脱落トルク性能を予測するシミュレーションでも利用されている[1]。



本研究では有限要素解析ソフトウェアから出力された解析結果データファイルを読み込み、上記要素応力値チェックし該当有限要素を削除し、繰り返し計算を行うプログラムを追加作成した。モデル作成には Hyperworks[2]、有限要素解析にはオープンソフトウェアの CalculiX[3]を、解析結果の可視化には Paraview[4]を使用した。
以上の検討にもとづく、多孔体バイオセラミックスの圧縮・ねじり破壊シミュレーションの結果を以下に示す。
破壊を伴うシミュレーションにより再現した、多孔体セラミックスの圧縮とねじり荷重による変形の一例を下図示す。ここでは多孔体セラミックスの脆性破壊が引張応力によって発生すると仮定し、有限要素内の最大主応力値が 300MPa(アルミナセラミックスを想定)を超えた場合に該当要素を消去することとした。強制変位量を 25.8μm(モデル全体へのひずみ量が 0.3%)に達するまで徐々に増加させ、破壊と変形挙動をシミュレーションした。

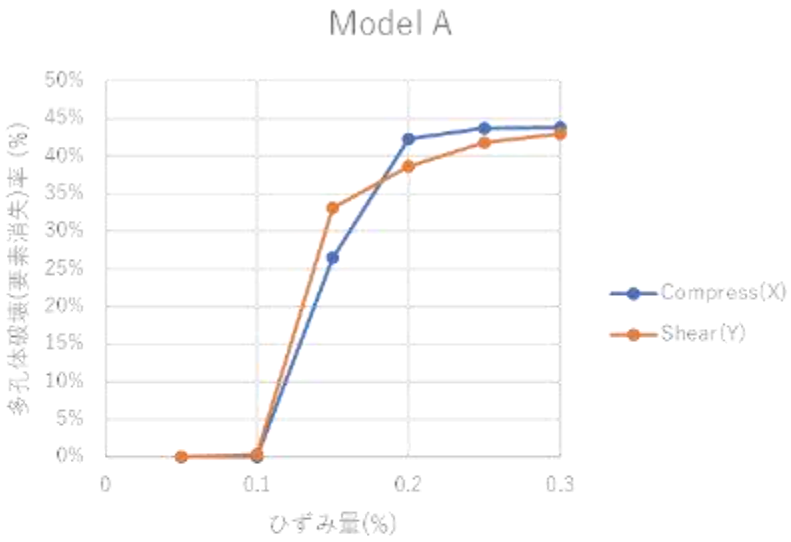


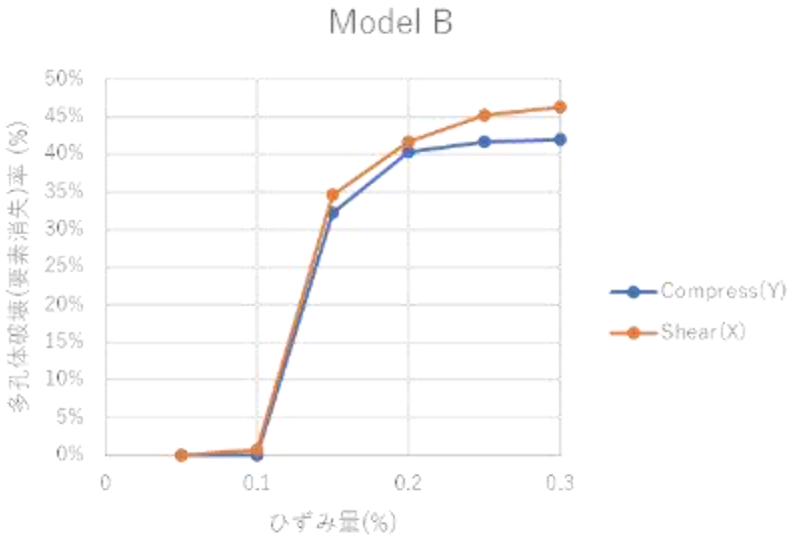
シミュレーションに用いた試料形状は、先に示した 3 種のマイクロ CT 有限要素モデル

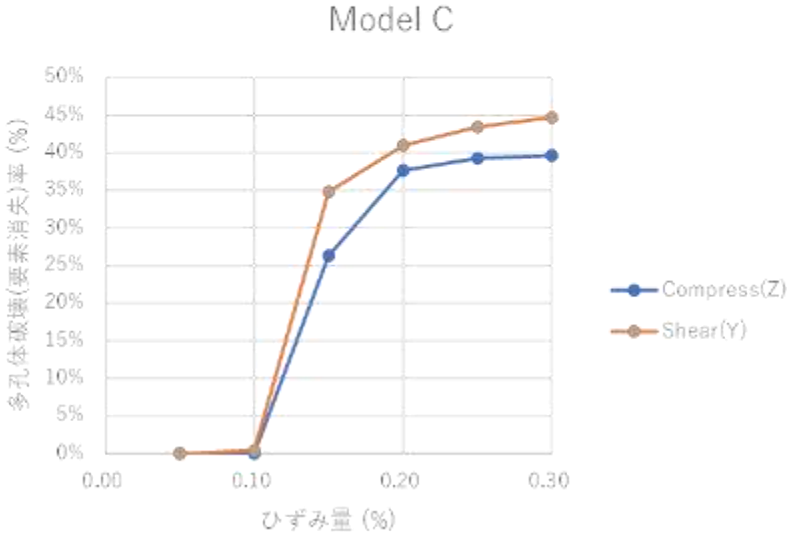
全てについて実施したが、圧縮負荷およびねじり負荷においてそれぞれ特徴的な変形が得られた。すなわち圧縮負荷の場合には破壊に達する最大主応力が主に上部、強制変位作用側で主に発生している一方、ねじり負荷(せん断負荷)の場合には領域中央部で破壊が発生する傾向が観察された。また、圧縮負荷の場合には全体ひずみ量 0.3%の時点で最大主応力がほとんど観察できないことから、この時点で多孔体セラミックスがすでに荷重が伝達できないほど破壊された状態になっていると考えられる。一方ねじり負荷ではまだ高い最大主応力の発生が確認でき、まだ多孔体セラミックスが荷重支持機能を維持していることがわかる。これらの特徴は 3 種のモデルすべてで確認された。

圧縮負荷とねじり負荷のそれぞれについて、シミュレーションに供した有限要素モデルＡ～Ｃにおいてどの程度の破壊が発生したのかを調査した。結果を以下のグラフにまとめた。いずれのモデルでも、ねじり負荷による多孔体セラミックスの破壊が、圧縮によるものに比べほぼ同じか多い結果になった。また、すべてのモデルにおいて、圧縮による破壊がひずみ量 0.2%までで終了しているのに対し、ねじり負荷ではひずみ量 0.3%でも増加傾向にあることがわかる。

ひずみ量 0.3%時点での要素消失率、すなわち破壊進行度は、圧縮負荷の場合ではモデル A, B, C それぞれ 44%、42%、40%と分散するのに対し、ねじり負荷ではモデルがことなっていても 45%程度であるのに加え、ひずみ量に応じた破壊進行推移も近似している。このことから実機試験においても、ねじり負荷試験のほうが圧縮荷重試験にくらべ安定して実験結果を得ることが出来るのではないかと予想される。


Model A
50%
45%
40%
35%
30%
25%
20%
15%
10%
5%
0%
多孔体破壊(要素消失)率 (%)
0
0.1
0.2
0.3
ひずみ量(%)
Compress(X)
Shear(Y)


Model B
50%
45%
40%
35%
30%
25%
20%
15%
10%
5%
0%
多孔体破壊(要素消失)率 (%)
0
0.1
0.2
0.3
ひずみ量(%)
Compress(Y)
Shear(X)


Model C
50%
45%
40%
35%
30%
25%
20%
15%
10%
5%
0%
多孔体破壊(要素消失)率 (%)
0.00
0.10
0.20
0.30
ひずみ量 (%)
Compress(Z)
Shear(Y)

考察

以上の通り、破壊を考慮した有限要素シミュレーションの方法(スキーム)を構築し、多孔質アパタイトセラミックスを想定した、多孔体セラミックス材料の圧縮およびねじり試験に適用したところ、を想定した微小構造の変形挙動を再現できた。今回のシミュレーションでは 1 辺 0.43mm(=430μm)立方体の 3 D モデルに対し、構成する有限要素サイズは 4μm としたが、標準化にあたってはどの程度のサイズにすべきかを検討する必要があろう。同様に標準化を念頭に解析ソフトウェアもオープンソフトウェアを使用し、国内外で対応可能で技術的にも容易なシミュレーションスキームを構築した。この方法では近年盛んな GPU やマルチプロセッサによる計算速度向上など、解析規模の拡大も可能であり、産学連携や海外研究機関と連携した国際的ラウンドロビンテスト(Inter-Laboratory Test)も見込まれる。

また、圧縮およびねじりシミュレーションの結果から、ねじりによる強度評価が圧縮荷重を用いるよりも安定した結果を得られる示唆を得た。多孔体バイオセラミックスの強度評価にねじり試験が重要であることはこれまでも報告されており、本研究の成果はこれらを支持している。骨補填材としてバイオセラミックスを活用することは日本が国際的に先導しており、バイオセラミックス分野での国際的イニシアチブをさらに強固するために、数値シミュレーションによる力学強度評価を早急に確立すべきであると考える。

参考文献

1) Murase Kohei, Stenlund Patrik, Thomsen Peter, Lausmaa Jukka, Palmquist Anders, Three-dimensional modeling of removal torque and fracture progression around implants, JOURNAL OF MATERIALS SCIENCE-MATERIALS IN MEDICINE, 29(7), DOI: 10.1007/s10856-018-6108-7, 2018.
2) https://altair.com/hyperworks-2023
3) CALCULIX: A Free Software Three-Dimensional Structural Finite Element Program, http://www.calculix.de/
4) Paraview, https://www.paraview.org
5) たとえば、村瀬晃平, バイオセラミックスのねじり強度調査と試験片デザインの検討, R4 年度 PRISM プロジェクト報告書, 2023.

第 6 章　まとめ～日本が策定すべき国際標準～

ISO/TC150 で日本が目指す標準化

先ず、骨再生に用いられる材料とその中での人工骨の位置づけ、及び人工骨の分類について、以下に詳述する。

骨再生に用いられる材料は、自家骨と骨補填材に大別される。自家骨とは外科手術にて自身の体のある部分からブロックとして切り取り、ブロックのままか、顆粒状に砕いたあと、骨が足りない部位へ移植される骨を指し、補填材料の性質としては、最も確実性が高く治療に用いられてきている反面、患者への負担が大きい手法でもある。

一方、自家骨に依らない骨再生に用いられる材料全般を骨補填材と呼称する。骨補填材は、生体に由来する材料と人工骨に大別することができる。前者については、ヒトのドナーから供給された骨を脱灰や冷凍乾燥処置した他家骨と、ウシなどの動物由来の骨を焼成した無機物である異種骨に分けられる。これらは処理工程で細胞を除いているため自家骨に匹敵する骨伝導性は獲得できず、また未知のウィルス感染の危惧があるとされている。化学合成した人工材料からなる人工骨については、その材質によって、セラミックス製、樹脂製、金属製に分類される。

自家骨		
骨補填材	他家骨	
	異種骨	
	人工骨	セラミックス製
		樹脂製
		金属製

セラミックス製人工骨については、骨欠損部、または空隙部に充填することにより、人工骨内部に骨代謝に関与する細胞等が侵入し、材料の分解および新生骨の形成が誘導される吸収性骨補填材料と、骨に置換されず体内に残る非吸収性骨補填材料に分別される。

項目	生体への吸収性に基づく分類		生体との活性作用に基づく分類	主材料の例
セラミックス製人工骨	吸収性骨補填材料		生体活性型	β-TCP
		タンパク質含有型骨補填材料		コラーゲン含有 HAP
	非吸収性骨補填材料			HAP
			生体不活性型	アルミナ

人工骨に要求される技術的な要件は、

① 構造支持体としての十分な強度

② 手術中の形状調整が可能な加工性・取り扱いやすさ

③ 骨組織との高い親和性

④ 生体内での分解吸収性
⑤ 骨形成を促進する活性
をあげることができる。

構造支持体としての強度とは、主に体重や運動における加重に耐えるということであり、この目的には気孔を持たない緻密体セラミックスが最も容易に適用可能な訳であるが、吸収置換型人工骨のように生体との活性が求められる人工骨では一般に、内部に気孔と称する微空隙構造を多数有する多孔体人工骨が用いられる。多孔体人工骨は生体内に埋設後、気孔内に新生骨が形成され母床骨と一体となる。通常、骨形成やリモデリングには埋設後 2〜3 か月程度要する。その埋設初期において、局所のメカニカルストレスに耐える初期強度と生体との親和性を保つ特性を両立する材料設計が求められる。

人工骨に求められる骨親和性とは、生体内埋設後、異物反応を惹起せず骨と直接結合する、骨伝導能とよばれる人工骨の性質である。りん酸カルシウム系セラミックスは一般に骨との親和性が高く、また生体内で分解・吸収をうけるものもあり、現在広く臨床に用いられている。骨形成を促進する生理活性物質である骨形成因子は、筋肉内など異所性に骨を形成する能力、骨伝導能を持っている。一部セラミックス材料もこのような骨伝導能を持つことが報告されるが、生理活性物質に比べて活性は弱い。いかに骨伝導能を高めるかが材料開発で求められる課題の一つである。

骨補填材料において造骨性に影響を及ぼす特性は、材料化学特性と機械特性に大別される。材料化学特性は上述のような生体親和性や吸収性等を指す。一方、機械特性は骨細胞の侵入に直接相関する空孔径や空孔の連続性などの微構造や生体の構造材としての力学特性など多様であり、力学特性についても、骨格としての強度や術中のハンドリング性などの様々な場面に関わる他、ストレスシールディングなど生体メカニズムとの関連も検討する必要がある。一般に吸収性と強度は、空孔の割合が高くなるほど細胞の侵入は容易になり骨形成が促進される一方で、空孔の割合が高くなると人体を支える構造部材としての破壊強度が低下し手術箇所の破壊に至る懸念も高くなるというトレードオフの関係。高度な要求に応え、材料化学特性と機械特性を両立させる緻密な構造制御を可能にする技術として注目されているのが積層造形である。

例えばβ-TCP の微粒子を CAD データに基づき一層ずつ硬化させて積層することで微構造の異方性や部位ごとの違いを実現する技術が開発されている。

こうした技術は、日本の有する下記アドバンテージによるものだ。

□ セラミックス研究の深化
□ 無機、高分子、金属、医・歯科の連携と研究蓄積
□ トップクラスのセラミックス産業界の下支えと、分析、検査、製造設備など関連分野の充実

日本のアドバンテージを維持していくために、ISO/TC150（外科用インプラント）ではセラミックスインプラント特性評価等の提案を続けている。例えば 2018 年に発行された ISO19090:2018 では多孔体の細胞侵入性を測定する試験法を確立。各国で臨床的に広く使用されている多孔性生体活性セラミックスを基準物質として用いながら、セラミック材料の細胞遊走能を測定・記録 するために従うべき試験法を規定した。こ

の試験法によって集められたデータから、骨欠損部の再生を可能な限り早くするためセラミックス製骨補填材料に求められる特性が明らかになってきている。ISO/TC150において特性評価に関わる規格開発を日本が先導していくことは、市場をリードすることに直結すると期待している。

他国や他 TC で当分野に関わる規格開発動向調査を行ったところ、空孔形状の二次元断面測定に利用可能な国際規格は有るものの、内部多孔体の再現性など医療機器向けの三次元測定評価に利用できる規格は存在しないことを確認できた。ISO/TC213 国内委員会からは、X 線マイクロ CT 性能検査規格が TC 内で現在議論されていること、三次元形状再現性評価の国際規格は現状、校正物との測定比較を用いる ISO 15530-3 のみであるとの情報を得た。

医療現場となる整形外科領域では、骨補填が必要な場合自家骨を使用していたが、骨補填材料としてセラミックス製人工骨が利用され始め、自家骨の代替になりつつある。患者に良い治療を提供したいという医師の強い思いと、企業における基礎研究および長期にわたる検証試験により生体材料として発展している。整形外科治療にはインプラントとナビゲーションシステムの 2 大領域があり、前者は QOL 向上、後者は治療時の負担軽減につながる。医療現場からは施術時に使用する骨補填材選択のための評価基準が、企業経営サイドからは市場への出荷にあたり医薬品医療機器法による QMS の確立と、品質管理プロセスの明確化が求められている。

日本ファインセラミックス協会は ISO/TC150（外科用インプラント）国内審議団体として、また ISO/TC150 SC7（組織工学）幹事国として、市場調査を通したグローバル動向把握・各企業の技術開発に利する情報の提供を行いながら、当分野での国際標準化活動を維持していくことに大きな意義を感じている。

研究調査を通して見えてきた方向性

３次元プリンタにより微構造制御した骨補填材の作製が可能であるか、また得られた試料をμCT 撮像し、設計データとの差違がどれほど存在するかについての検証においては、アルギン酸ナトリウムと水酸アパタイト粉末の混合スラリーによる 3 次元構造体作製条件の設定を試みたが、2 層目の積層や、1 層目の固定に課題があることが明らかになった。主な要因として、基板とスラリーの親和性の低さがあると考えられる。今回の実施試験では、本技術の最終的な適用目的としてとして細胞培養試験やインプラント材料として用いることを想定して、最も簡便かつ確実に滅菌されているポリエスチレン製細胞培養皿を用いた。この培養皿の表面は親水性が比較的低いため、水ベースのスラリーをはじきやすくなっている。そこで、現在検討中の基板として、滅菌可能なものとしてガラス製シャーレ（培養皿）や多孔質セラミックス吸収板など、より親水性が高いものや余剰の水分を吸収する素材などを用いることで、3 次元構造体を作成可能だと考える。実際、成形後に焼成するような素材を用いる系では基板の選択肢が広いため、セラミックス三次元構造体の作製に成功し、一部は市販もされていることなどを参考として、生体用材料に対する基板の最適化によって、3 次元構造体の作製が可能であるとの見通しが得られた。引き続き基板及びスラリーの最適化の

検討を実施し、AM による 3 次元構造制御骨補填材に関する国際標準の策定を目指して研究を推進していく必要がある。

3 次元構造物の表面性状、及び粘弾性の評価方法確立を目指した研究調査においては、モデル表面形状および深部の硬さが医療機器性能評価に非常に高く寄与していることが分かった。疾患モデルの形状構築には 3 次元プリンタが多く用いられるが、医療機器はモデルに接している状態で使用されるため、モデルの粘弾性や表面形状（摩擦）が医療機器の性能に影響を与えるにもかかわらず、構築したモデルの粘弾性や表面形状（摩擦）についての検証法の規格がない。現場の医師らが摩擦と称してカテーテルの性能を伝える場合、カテーテルが進む方向と摩擦させたい方向は必ずしも一致していない。さらに脳血管においては蛇行が激しいため、この方向性はほぼ一致しないことが確認できた。このことから、実情に即した新たな形状を ISO として提案し、カテーテルの性能を評価する規格を作ることが不可欠であるという結論に達した。

AM 造形セラミックス人工骨の形状評価と力学強度評価に関する国際標準化で標準化すべき試験方法や標準化するための課題を明らかにするための調査研究においては、多孔体バイオセラミックスの圧縮・ねじり破壊シミュレーションを実施した。多孔質アパタイトセラミックスは骨折時や骨切り後の生体骨の修復材料として、国内の臨床現場でひろく利用されている。多孔質アパタイトセラミックス内の孔の中に骨細胞が入り込んで増殖し、徐々に人工骨が天然骨に置き換わるあいだ、バイオセラミックスは、日常生活における複雑な力学的負荷、すなわち曲げやせん断、ねじりなどが複合して繰り返される荷重に対して、高い耐久性を有する必要がある。ただ生体材料向けの多孔質アパタイトセラミックスを力学試験に供することは容易ではないため、有限要素解析などを用いたコンピュータシミュレーションが有効となる。標準化を念頭に解析ソフトウェアもオープンソフトウェアを使用し、国内外で対応可能で技術的にも容易なシミュレーションスキームを構築。この方法では近年盛んな GPU やマルチプロセッサによる計算速度向上など、解析規模の拡大も可能であり、産学連携や海外研究機関と連携した国際的ラウンドロビンテスト（Inter-Laboratory Test）も見込まれる。また、圧縮およびねじりシミュレーションの結果から、ねじりによる強度評価が圧縮荷重を用いるよりも安定した結果を得られる示唆を得た。多孔体バイオセラミックスの強度評価にねじり試験が重要であることはこれまでも報告されており、本研究の成果はこれらを支持している。骨補填材としてバイオセラミックスを活用することは日本が国際的に先導しており、当分野での国際的イニシアチブをさらに高めるため、数値シミュレーションによる力学強度評価を早急に確立すべきである。

さいごに

当事業では米国・欧州・韓国・オーストラリア訪問によるリエゾン TC との意見交換及び海外調査、そして試験機器導入による研究調査を実施することができ、今後の TC150 活動にとって大きな支えとなった。改めて「2023 年度医療機器に関する国際標

準化（ISO/TC 150）Additive Manufacturing による生体用構造物の特性評価方法に関する国際標準化」に心より感謝を申し上げたい。

セラミックス積層造形に関する技術開発は欧米を中心とし活発に行われており、米国 NIST では既に ASTM での規格作りに向けたデータ収集が進んでいる。セラミックス積層造形は用途により、主にヘルスケア・航空宇宙・防衛、自動車などに分けられ、各用途での市場成長予測が明るい。その中のヘルスケアに関し ISO/TC150 では、現場の医師と患者が必要とする製品開発と製品普及を目的とし、日本の得意分野での国際標準化を進めていく。その推進のためにはこれからも政府の支援が必須である。現在多くの TC で専門家のシニア化が問題となっている。国際標準化は短期で企業の利益に直結するものではなく、例えば任期数年の経営陣からの理解が得づらい、国際標準化活動に対する社内評価が難しいなど、各企業による取組がなかなか進まないこと、また大学における評価対象が論文中心となっていることなどが背景にある。近年経済産業省が積極的に国際標準化戦略の重要性を発信し、プロジェクト採択条件に国際標準視点の有無を取り入れるなど、企業・研究機関への働きかけが強化されている。2 月には経団連提言に国際標準戦略の文字が登場している。これを機運とし、国際標準化人材育成が進み、各国内審議団体での議論が活発化し、しいては日本提案による国際規格策定が企業戦略と強く結び付いていくことを切に願う。

この調査研究は、国立医薬品食品衛生研究所からの委託で実施したものの成果である。

本件についてのお問合せ先
（内容等）
〒105-0011 東京都港区芝公園一丁目 2 番 6 号
ランドマーク芝公園 2 階
TEL：03-3431-8271
一般社団法人 日本ファインセラミックス協会