

## 米国出張報告

2017年11月6日~9日、サンタフェ（Santa Fe）で開催されたCMC（セラミック複合材）国際会議（Advanced Ceramic Matrix Composites: Science and Technology of Materials, Design, Applications, Performance and Integration）に出席し、日米欧のCMC関係者と意見交換を行った。昨年度実施のRoadmap2050日米欧アンケート調査で米国の最大の関心はCMCであったが、セラミックスの競争力強化（①高機能化、②プロセス革新、③素材革新）のひとつ、素材革新としてのCMCへの関心の高さに変化はない。米国の空軍研究所のひとはCMCをゲームチェンジャーと言う、また、CMCのアプリケーションは航空機エンジンに留まらず自動車、発電、原子力、防衛とかなり幅広く捉えている。また、CMCに関して繊維を除いて日米の研究者層の格差は大きく、米国の底力を感じた。今回の会議に出席して、能天気（easy-going）に考えると大きな後れを引き起こし兼ねないというのが印象である。

また、滞在中にJFCAの米国パートナーであるUSACA（米国先進セラミック協会）と事務局会議をもちアップデートの意見交換を行った。

会場となったサンタフェは、米国ニューメキシコ州の州都（人口6万人）で、芸術家が多く住み芸術の町として有名で、日本では宮沢りえの写真集の舞台として知られている。

以下、出張概要を紹介する。なお、参考として既存の調査報告書を基に日本におけるCMC研究開発の状況をまとめた。

1. 日時：11月4日（土）～11月10日（金）、5泊7日
2. 出張先：La Fonda on the Plaza Hotel、サンタフェ市
3. 出張者：矢野友三郎 JFCA 専務理事
4. 日程：11月4日（土）成田発→サンタフェ着  
11月5日（日）国際会議準備  
11月6日（月）CMC国際会議  
ポスターセッション  
11月10日（金）サンタフェ発→  
11月11日（土）成田着

### 5. 報告：

#### （1）はじめに

近年、製造業では、CO2削減のため、①軽量化、②効率の改善による低燃費化、③サービス期間の延長により部品のランニングコスト削減の要求が強い。航空機エンジンの場合、機体重量の軽量化とエンジン温度及び圧力の増加で対応するが、この大幅な性能向上のためエンジン部品へCMCが導入される。ファインセラミックス

は軽量で耐熱性は大きいですが、単体では靱性が低く脆いため SiC 繊維との複合化で靱性の大幅改善を図る。ただ、重要な製品に新しい材料を導入する前には、高度な材料試験と評価の時期があり、今回の会議は CMC の実用化を前にした各国からの熱い発表に表れていた。

この CMC の新しい応用は、航空宇宙分野に限るものでなく、自動車、発電、防衛等の産業でも幅広い応用が期待されている。米国の市場レポート (Stratview Research 社) は、2026 年の市場規模は USD 7.51 Billion (8,260 億円) で市場規模は年率 9.65% 増 (2016~2026 年) とした。応用分野としては Aerospace & Defence、Transportation、Energy、Electrical & Electronic、Medical、Others。

日本は、CFRP 用炭素繊維の 70%、CMC 用 SiC 繊維のほぼ 100% のシェアを持つ先進繊維大国であるが、CMC の実用化では、先兵となる航空機市場が小さいため出遅れているのが実情である。

(参考) (公財) 航空機国際共同開発促進基金 解説概要 (航空機エンジンへの複合材適用の動向と将来)

## (2) CMC 国際会議の概要

CMC は、高温用素材として重要な複合素材であるが未解決の課題もあり、より一層の研究開発と市場開発が必要である。このため CMC の課題について、より深い議論と情報交換が重要で、今回の CMC 国際会議は、世界の関係者が一堂に介し、航空機用と発電用 CMC での最先端技術及び情報交換の場を提供する最初の国際会議である。また、国際会議の間に最近のホットな話題のポスターセッションを開催。

国際会議は、素材開発から製品化までの全ての研究開発とアプリケーションを包含し、主な分野は高度なセラミックの繊維、プロセス、評価、性能分析、品質管理、劣化及び環境遮蔽コーティング (EBC) 等である。米国の発表は、CMC 実用化を前にプロセス、性能保証、信頼性、試験・評価法などの講演が多かったのが印象的である。



なお、GE 社は 2018 年の CMC 製造を目指してアラバマ州 Huntsville に工場建設中。

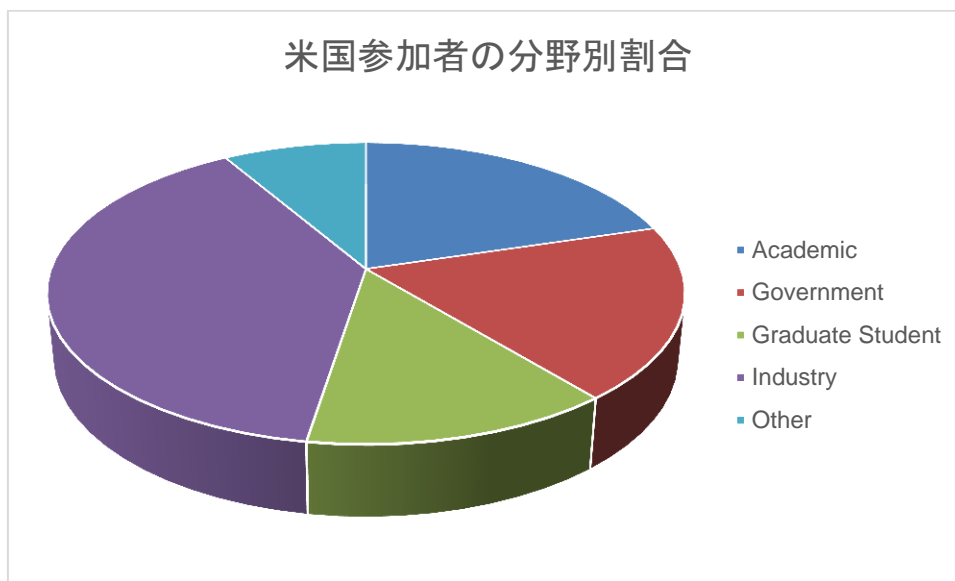
←(2016 年 6 月 16 日の鍬入れ式)

### (参加者)

出席者 (登録者ベース) は、6ヶ国から 114 名で、国別には下記のようになっている。米国空軍科学技術局アジア事務所 (東京) の研究者によれば、米国の主要な関係者が集う国際会議となっているとのこと。

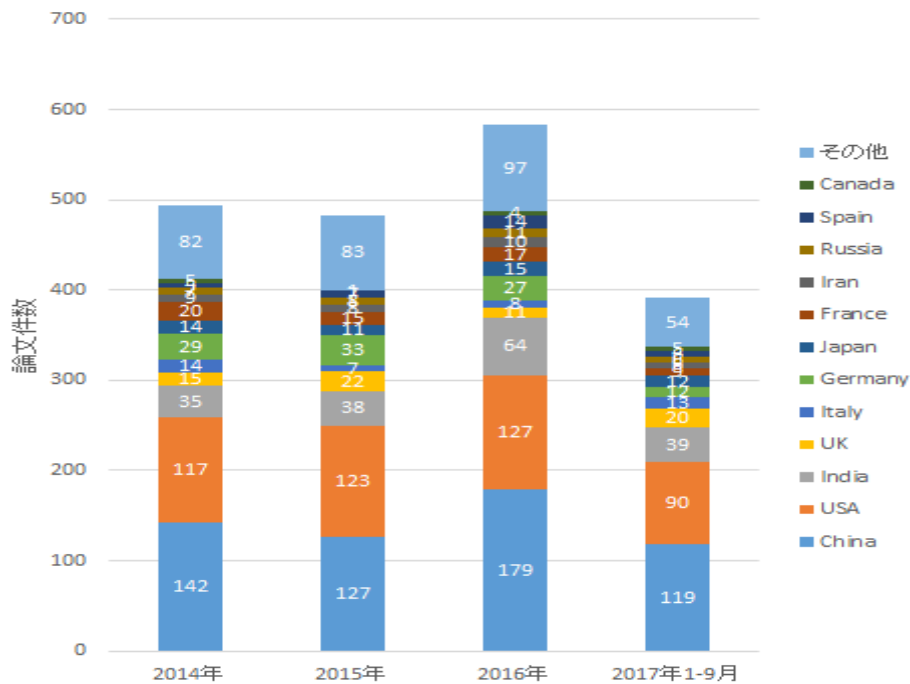
1. 米国:61名(事務局発表 65名)
2. 日本:34名(事務局発表 33名)
3. ドイツ:9名
4. フランス:5名(サフラン社 4名+大学1名)
5. 英国:3名(ロールスロイス社 3名+大学 1名)
6. イタリア:1名
7. 韓国:1名(国立蔚山工科大学)

米国の参加者の分類は次のとおり。米国産業界は、世界 3 大飛行機用エンジンメーカーの①ゼネラルエレクトリック社 (GE)、②ロールスロイス社 (RR)、③プラットアンドホイットニー社 (PW) からの参加者が 1 / 3 を占め、米国政府は、NASA (米国航空宇宙局)、オークリッジ国立研究所、空軍、海軍、陸軍と CMC 研究開発をリードしている機関。



現在、CMCの研究論文数(2016年)は、①中国 179件、②米国 127、③インド 64、④ドイツ 27、⑤フランス 17、⑥日本 15、⑦スペイン 14、⑧イギリス 11、ロシア 11、の順番で、中国からの発表・参加者ともにゼロだったのは関係者を驚かしたが実情は分からない。

CMC研究論文数の推移



### (3) 国際会議の運営組織

今回が最初となるCMC国際会議の取りまとめ役は、東京工科大学の香川教授(東京大学名誉教授)、事務局はJAXAの後藤准教授で、日本として大変喜ばしい。

#### 議長

Dr. **Yutaka Kagawa**, Tokyo University of Technology, Japan

#### 副議長

Dr. **Dongming Zhu**, NASA Glenn Research Center

Dr. **Ram Darolia**, GE Aviation (retired), USA

Prof. **Rishi Raj**, University of Colorado, Boulder, USA

#### 事務局長

Dr. **Ken Goto**, JAXA, Japan

#### 国際諮問委員会

Dr. **Jim DiCarlo**, NASA (retired), USA

Dr. **Kenichiroh Igashira**, Senior manager, Kawasaki Heavy Industries Ltd., Japan(川崎重工)

Dr. **Tania Bhatia Kashyap**, UTRC/Pratt, USA

Dr. **Allan Katz**, ARFL, USA

Dr. **Teruo Kishi**, Professor Emeritus, University of Tokyo, Japan(東京大学)

Dr. **Walter Krenkel**, University of Bayreuth, Germany(ドイツ)

Dr. **Jay Lane**, Rolls Royce, Indiana, USA

Dr. **Krishan Luthra**, GE, USA

Dr. **Gregory N. Morscher**, University of Akron, USA

Dr. **Dave Shifler**, ONR, USA

Dr. **Mrityunjay (Jay) Singh**, (OAI)/NASA, USA(前米国セラミックス学会会長)

### (5) 国際会議の概要

各セッションの概要は次のとおりである。4 日間にわたる 61 名のスピーカ及び演題は、ネットで公開されているので参照して頂きたい。この概要作成にあたっては、JFCC の北岡様、横井様、小川様にお世話になったので感謝申し上げます。

各セッション別の国別発表者数

セッション	米国	日本	ドイツ	フランス	韓国	イギリス	合計
1	基調講演及びプレナリー						
	4	1	0	1	0	0	6
2	集積設計と応用						
	5	1	1	2	0	0	9
3	先進材料とアーキテクチャ、インタフェース及び複合システム性能						
	4	0	1	1	1	0	7
4	加工と力学的挙動、NDE(非破壊試験)、モデリング及び寿命予測						
	5	0	0	0	0	0	5
5	ポリマー派生セラミックス及びプロセス						
	3	1	0	0	0	0	4
6	環境効果と CMAS 劣化						
	7	1	1	0	0	0	9
7	環境バリアコーティング: プロセス及び試験法開発						
	3	3	2	0	0	0	8
(小計)	31	7	5	4	1	0	48
	ポスターセッション						
	5	6	1	0	0	1	13
合計	36	13	6	4	1	1	61

○初日:11月6日(月)

Session I.

Plenary Session

本セッションでは、米国、フランス、日本のエンジンメーカーやエンジン部品メーカーにおける CMC 開発の変遷と将来動向に関する発表があった。CMC 開発は 1970 年代から進められてきたものの、2001 年の IDA (米国・防衛分析学会) のレポートタイトル “Will Pigs Fly Before Ceramics Do?” から読み取れるように 2000 年頃は CMC の実用化は困難であると考えられていた。しかしながら、その後の GE を中心とする先進的な研究開発により、現在では CMC を高圧タービンのシュラウドに使用した LEAP エンジンが A320neo や Boeing737 MAX に搭載されるに至っている。また、大型民間航空機用の GE9X エンジンも 2019 年にはボーイングに搭載される予定である。なお、現行の耐環境性コーティング (EBC) を付与した CMC の耐用温度は 2400F (1315°C) であるが、今後は、より過酷環境下への適用を目指して、2700~2800F (1482~1537°C) になるとのことであった。

フランスのサフランセラミックスからは、CMC 開発の現状と製品 (C/C, Carbon-Ceramics, Ceramics-Ceramics) について紹介があった。航空機用ブレーキディスクには C/C を使用しており、1980 年の開発当初に比べて現在では約 1/10 の製造コスト削減を達成した。また、今後は、2700F 級-T/EBC-CMC, Eutectic Ceramics (酸化物系), 3D 造形, 接合 (CMC-CMC, CMC-金属) に注目しているとのことであった。

さらに、IHI における CMC 開発動向に関しては、第三世代 CMC という位置づけで、耐用温度 1400°C を目指した次世代 EBC (SiAlON を EBC 結合層に使用) の紹介があった。

Session2: 複合材料設計と応用

Integrated Design and Applications

本セッションでは、CMC を製造プロセスと評価・解析技術を中心に議論が行われた。コロラド大学やサフランセラミックスからは、シミュレーションを用いた効率的な部材開発の一環として、SiC の 3 次元織物形成や部材周辺の流体解析、CVI プロセスのシミュレーション等について発表があった。また、航空機用以外の用途として、C/C や C/SiC と Al 金属を組み合わせた軽量ハイブリッドブレーキディスク製造に関する発表もあった。解析技術としては、CMC 組織をマトリックス、繊維、界面コーティングに分類して画像解析し、その結果を FEM

応力解析に展開する技術や、バーナーリグテストにおける熱機械的挙動をシミュレーションする研究等が発表された。

(注) 航空機エンジンの場合、機体重量の軽量化とエンジン温度及び圧力の増加で対応する。具体的には、エンジンの燃費改善の主な手段は、高バイパス比による推進効率向上と高圧力比による熱効率向上で、前者は大型化するファン部品の軽量化で CFRP (炭素繊維強化プラスチック) による重量削減。後者は高圧力比化と高温化による熱効率向上で CMC による効率向上。高圧力比エンジンでは、耐熱合金でなく CMC 材料を用いないと、冷却空気量増加により燃費低減効果が相殺される。

## ○2日目：11月7日(火)

**Session3:** 先進材料とアーキテクチャ、インタフェース及び複合システム性能  
Advanced Materials and Architectures, Interfaces and Composite System Performance

2日目以降は、本格的なアカデミックな会議で素人の私が理解するのは難しい面がある。冒頭の米国空軍は、CMCの実用段階を前に、鍵となる①繊維(ニカロン、チラノ)、②力学的特性、③コーティングについて多面的に分析し、CMC材料は妥当とした。今後の改善点としては、①耐力の増強、②欠陥の管理、③コストの削減とした。空軍は、タービンエンジン、ハイパーソニック機(極超音速)、ミサイル(マッハ6.5)への利用を想定している。米国はマッハ5超で飛ぶ超音速機の2030年までの実用化を目指して中国としのぎを削っている。

本セッションでは、CMCにおける繊維とマトリックスの界面に関する研究・開発の動向が発表された。SiC繊維の場合、SiC繊維表面の酸化やコーティング層の劣化が問題となり、CMCプロセス(PIP法やCVI法)がクリープ特性等に及ぼす影響などが議論された。電子顕微鏡を用いた微構造・元素分析やX線CTによる3次元構造に基づく酸化反応FEMシミュレーションなどによる現象の解明も進められている。

午後：市内見学

バスにてバンデリア国定公園に向かい、ネイティブアメリカンのプエブロ族の集落跡を見学した。その後、地ビール工場を見学した。

## ○3日目：11月8日(水)

**Session4:** 加工と力学的挙動、NDE(非破壊試験)、モデリング及び寿命予測  
Processing and Mechanical Behavior, NDE, Modeling and Life Prediction

本セッションでは、CMCの破壊挙動の解析技術について発表された。高温・酸化環境や冷却時など実用環境で生じるクラック発生・進展のin situモニタリングに加え、CMCの健全性の非破壊検診に使用可能な超音波法、電気抵抗測定

法などの研究が進められている。

**Session5:** ポリマー派生セラミックス及びプロセス

Polymer Derived Ceramics and Processing

本セッションでは、原料となるポリマーの分子構造制御による SiC/SiC CMC の合成と組織制御に関する発表がなされた。酸素がガスとして抜けるプロセス、Al や Hf などの添加元素による改質の他、BN コーティングの影響などが議論された。

**Session6:** 環境効果と CMAS 劣化

Environmental Effects and CMAS Degradation

本セッションでは、CMAS (Calcium - Magnesium - Alumino - Silicate の略) がたい積することによる EBC の劣化挙動、ならびに、その後に生じる結合層 (主に Si) や CMC の酸化挙動に関しての発表があった。CMAS-EBC 間の反応性や EBC 内への浸透抑制に関する研究は進んでいるが、水蒸気も含まれる環境の影響と対策は今後の研究課題と考えられる。また、NASA 等においては、従来の Si 結合層に代わる新たな素材についても精力的に検討されていた。

(注) CMAS とは、CaO, MgO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub> からなる融液 (付着物) で CMAS と称される。

**○4日目：11月9日(木)**

**Session7-1:** 環境バリアコーティング 1：プロセス及び試験法開発、

Environmental Barrier Coatings-1: Processing and Test Development

本セッションでは、EBC に関する設計と試験評価を中心とした発表が行われた。JFCC は、熱力学的安定性の検討や高温酸素透過実験の結果を基に、SiAlON 結合層を用いた新たなコーティング構造を提案するとともに、ダブル電子ビーム PVD 法によりその構造を形成することに成功している。このコーティング材は優れた耐熱サイクル性を発現することのであった。また、DLR 航空宇宙センターは、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 系 CMC の保護膜として、Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> からなる EBC を開発している。

**Session7-2:** 環境バリアコーティング 2：力学及び破壊メカニズム

Environmental Barrier Coatings-2: Mechanics and Failure mechanisms



本セッションでは、EBC の界面破壊、及びプラズマスプレープロセスに関する発表がなされた。香川教授や垣澤氏（NIMS）からは、EBC で生じる界面の破壊メカニズムの解析や界面破壊靱性の新しい手法の提案がなされた。電子ビーム PVD で作製した EBC の密着性と溶射で作製した EBC の密着性を比較するなど、定量的な界面の密着性の評価手法が確立しつつある。

### CMC 国際会議の風景



米国からの発表



ドイツからの発表



歓迎会（香川組織委員長）



日本からの発表

## 米国の発表機関リスト（セッション別）

米国の発表機関を各セッション別に分類すると次のようになる。なお、過去のCMCに関する同様な会議で、米国の研究開発の状況が海外関係者に詳しく発表されたのは初めてではないかと言う人が多かった。その意味では、今回のCMC国際会議は大変有意義なものであった。

米国には、CMC関係者で作成されたCMC Handbokk17 Vol.5が発行（FAAがスポンサー、NASAハンドブックと呼ぶ人もいる）。FAA(米国航空局)は認証ではルールがない場合には公知された企業ルールを使うとされているため、CMCの普及では大きな役割を担う資料。初日のセッション1でNASAが最新版について解説。<http://store.sae.org/cmh-17/>

セッション	米国			
	件数	産業界	大学	政府機関
1	4	2	0	2
		GE 2		NASA 1、海軍 1
2	5	1	0	4
		Teledyne Sciene 1		NASA 3、空軍 1
3	4	0	1	3
			アラバマ大 1	NASA 2、空軍 1
4	5	1	4	0
		P&W 1	カリフォルニア 2、オラホマ 1、アロン 1	
5	3	1	2	0
		クアーズテック 1	コロンビア大 1、ミネソタ大 1	
6	7	1	3	3
		MR&D 1	バージニア大 2、カリフォルニア大 1	NASA 1、空軍 1、海軍 1
7	3	0	1	2
			バージニア大 1	NASA 2
(小計)	31	6	11	14
ポスター	5	2	1	2
		Free From Fiber 2	フロリダ州立大	NASA、陸軍
合計	36	8	12	16

(備考 1) 米国で歴史的に複合材が強い大学は、カリフォルニア大学・サンタバーバラ校及びデンバー大学。

(備考 2) 米国でCMC関係の論文発表(最大規模)は、米国セラミックス学会が毎年1月デイトナビーチで開催のInternational Conference

and Expo on Advanced Ceramics and Composites (ICACC) 会議。  
ただし、CMC のクローズ会議はココアビーチで開催。

### 日本の発表機関リスト（セッション別）

セッション	日本			
	件数	産業界	大学	政府 機関
1	1	1	0	0
		IHI		
2	1	1	0	0
		NGS		
3	0	0	0	0
4	0	0	0	0
5	1	0	1	0
			大阪府大	
6	1	0	1	0
			東京工科大	
7	3	0	1	2
			東京工科大	NIMS,JFCC
(小計)	7	2	3	2
ポスター	6	0	2	4
			東大	JAXA 2 ,NIMS
			東京工科大	JFCC
合計	13	2	5	6

(備考 1) 東京工科大学は、今年 4 月に香川教授（東大名誉教授）が同校  
に開設した CMC 研究センター。大阪府立大学・成澤教授は、繊維  
を発明した東北大学・故矢島教授の流れを汲む研究室。

(備考 2) 日本で CMC 関係の論文発表は、日本セラミックス協会（学会）、  
日本金属学会、日本複合材学会等で小規模に開催。CMC 関係者  
の論文が一堂に発表される横断的な学会運営の検討が必要。

(備考 3) 国研に代表される政府機関への CMC 関係予算の規模は米国に比  
べて日本は大幅に少ない。米国政府の総研究開発費は日本政府の  
4 倍、その半分は DOD（国防総省）と言われる。

### ○ポスターセッション

1. Residual stress measurement of Yb silicates by Raman spectroscopy: First-principles and experimental studies（日本：JFCC）

2. Oxidation Mechanisms of ZrB<sub>2</sub>-Based Ultra High Temperature Ceramic Matrix Composites (日本 : JAXA)
3. Microstructure Control of Multi Layered EBC Prepared by Dual Electron Beam PVD (日本 : JFCC)
4. Numerical simulation of energy release rate for interface crack initiation due to thermal stress in environmental barrier coatings for Silicon carbide (SiC) fiber reinforced SiC matrix composite (日本 : 東京大学)
5. The potential of plasma activation for EB-PVD of EBC systems on CMC components (ドイツ : フラウンホーファー研究機構)
6. SiC/SiC composite truster for a non-toxic liquid propellant rocket engine (日本 : JAXA)
7. Measurement of delamination toughness of EBC layer from 2D/3D SiC/SiC substrate: Experiment and analysis (日本 : 東京工科大学)
8. How not to measure the tensile strength of high-modulus fibers (米国 : Free Form Fibers)
9. Strong and flexible ceramic composites with high electrical/thermal conductivity (米国 : Free Form Fibers)
10. Cost-Performance Analysis of Silicon Carbide fibers (米国 : Free Form Fibers)
11. High-temperature ceramic matrix composites using microwave enhanced chemical vapor infiltration (英国 : バーミンガム大学)
12. Interfacial characteristics and microstructural evolution of ceramics exposed to high temperature sand laden combustion environments (米国 : NASA)
13. Environmental barrier coating fracture, fatigue and high-heat-flux environment failure mechanisms and stochastic progressive damage simulation (米国 : NASA)

3日目のバンケットで、ポスターセッションの優秀者に表彰状と金一封が贈られた。日本人はJFC横井（最優秀賞）、東京大学・河合、東京大学・青木（優秀賞）氏の3名。

（米国の現状）

GEは、2016年6月、米国アラバマ州Huntsville市で、航空機エンジン、発電エンジン向けのCMC量産工場の建設に着手。GE社の投資額240億円、DOD空軍支援は26億円で、2018年前半に新工場が完成し、製造ラインは2018年にスタート予定。現在までのLEAPエンジン受注は12,500基（2017年6月現在）と報道されている。

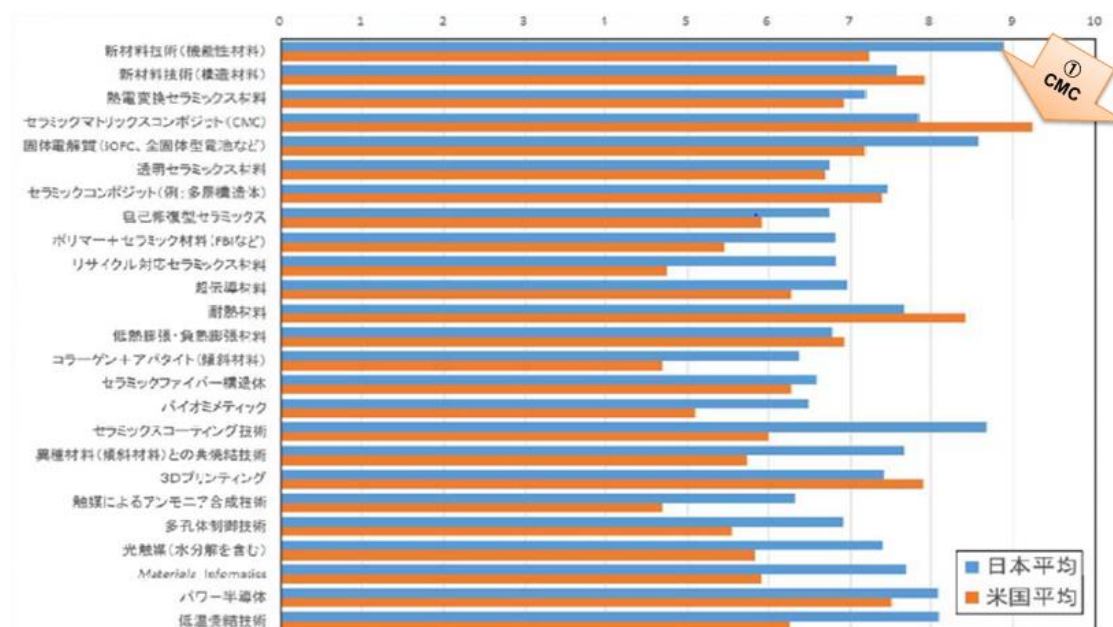
ロールスロイスは、2016年11月、カリフォルニア州南部のサイプレスで、CMC材料およびプロセスの研究開発に専念する新たな62,000平方フィートのCMC技術ハブに3000万ドルの投資拡大を発表。同時に「軽量で強固な複合繊維部品の開発は、燃料消費量、排出ガス、騒音の低減に焦点を当てるとした。(出所: Ceramic Industry誌)。

米国のCMCは既に商用化の段階にあり、関係者の話では、現在、CMCの課題としては次のようなものが上がっている。

- CMC部材の劣化、CMAS (calcium–magnesium–alumino–silicate) の付着
- 繊維強度、柔軟性、高温下でのクリープ耐性、界面コーティングの安定性等の性能評価
- CMCのパフォーマンスを制約するメカニズムの理解とその制約条件を考慮した性能予測モデルツールの開発
- 高温での性能検証に使用する耐熱試験設備の開発
- 専門性を有する人材の不足

下図は、昨年JFCA設立30周年を記念して策定したセラミックスのRoadmap 2050 (2016年11月発行) で、日米合同アンケート結果を比較したもの。米国の今後のキーテクノロジーの第一位は、①CMC、②耐熱材料、③3D。日本は、①機能性材料、②コーティング、③固体電解質。

### セラミックに必要な今後のキーテク (日米アンケート調査、2016年)



(出所) Roadmap 2050、日本ファインセラミックス協会

## 8. JFCA-USACA 事務局会議(11月8日)

JFCAの米国パートナーである USACAC(米国先進セラミックス協会)技術部長の Doug Freitag 氏と最近の状況について意見交換を行った。

(最近の活動)

USACAは、セラミックスへの関心の高まりで JFCA と同様に会員数が増加中。現在、4つのWG、①原子力材料、②CMC、③透明セラミックス、④人材開発で活動中。今回、WG の進捗状況について聞くと、④の教育は大学がイニシアチブを持ったため遅れている。当面は学生専用のHP作成や議への無料参加を検討中。JFCA から、来秋スタートの会員企業7社を講師として派遣する東工大セラミックス講座を紹介。米国の課題は、先端技術の海外(特に中国)流出で、政府が留学生を規制しないので困っているとのこと。なお、③透明セラミックスは、光透過性の高いセラミックスと電波透過性の高いセラミックスがあり、前者はレーザ媒質、後者はミサイルのレドームに使われ安全保障上で特に重要な材料のひとつ。

新しい動きとしては、来年にCMC, モノシリック、C/Cを含むハイパーソニック材料(3000度)のWG新設を準備中。これは2日目に米国空軍研究所が発表した CMC のタービンエンジン、ハイパーソニック機(極超音速)、ミサイル(マッハ6.5)への利用を想定している話とつながる。現在、米国は2030年までのマッハ5超の超音速機の実用化を目指し中国としのぎを削っており、CMC 予算増額には説得力のあるストーリーができる。また、連邦政府、学界、産業界に役立つ技術ロードマップの開発、現在、センサーウィンドウに焦点を当てたロードマップを作製中で完成次第に JFCA へ送付する。更に、国防総省、NASA、商務省、エネルギー省等の代表者が集まるセラミック研究開発支援調整委員会 (ICCCRD : Interagency Coordinating Committee on Ceramics Research and Development) への最新情報の提供(年1回)。セラミックス関係予算獲得に向け米国議会とのチャンネルも強い。

話題としては、CMC 開発のために NASA、DOD、DOE に対して、毎年50百万ドル(55億円)を10年間、総額500百万ドル(550億円)の予算を獲得したこと。また、ニカロン、チラノ繊維と同様に、米国にベンチャー企業(Advanced Ceramic Fiber (ACF社:USACA 会員)、Free From Fiber(FFF社))が発足。現在、繊維については日本が世界市場を独占しているが、10年後は分からない。更に、欧州のパートナーについて意見交換を行ったが、先進セラミックスに特化した団体がいないため継続課題とした。

(CMCについて)

USACAC 技術部長の Doug Freitag 氏(元ロッキード・マーティン社勤務)は、仲間からウキペディアと言われる好人物。彼曰く CMC は航空宇宙、防衛、自動車などのハイテク産業のさまざまな分野に複数の利点をもたらすもの。米国でも過

去 30 年間にわたり前進と後退はあったもののCMCの研究開発が継続して行われた結果、この5年間で商業化が大きく前進。製造コストは過去30年間で一桁減少し、航空宇宙、防衛、自動車、半導体および産業用回転機器部門で CMC の有用性が高まっている。過去に CMC を考えていなかった人々も大きな関心を寄せている。CMC は従来のモノリシックセラミックスの利点のすべてをもち、かつ、セラミックスの弱点であった脆弱性を克服。ポリマーと比較して、はるかに高い作業温度（1,400°C以上）、化学的安定性及び高い耐摩耗性/耐摩耗性をもつ。CMC で重要なことには、寸法安定性と3~5倍の重量減少をもたらし、より長い寿命でより熱く、より速く、より軽く"Hotter, Faster and Lighter"と言う。例えば、飛行機の軽量化で、同じ量の燃料でさらに遠くへ飛行できる。



## 6. 所感

今年8月発表の米国市場レポートは、CMC市場規模は年率9.95%増（2017~2021年）を予測し、ここ2年はGE社のLEAPエンジンに代表される航空機用が占めるとした。レポートでは、市場の主要なドライバーは、軽量化と高性能素材を武器に様々な産業分野、航空宇宙と防衛、自動車産業で広く使われるとし、主要なベンダーは、COI Ceramics、General Electric、Lancer Systems、Rolls-Royce、SGL Group、Ultramet、また、次のベンダー（Other prominent vendors）として、3M、Albany International、Applied Thin Films、Automated Dynamics、CeramTec（ドイツ）、CoorsTek を上げ日本企業はいない。更に、軍事費増強による中国、インドの軍事・民需での航空機分野のCMC市場の拡大を予測した。

一方、日本におけるCMCの研究開発は米国と同様に長く、1975年に東北大学の故矢島教授がCMCで用いるSiC繊維を開発、その後、宇部興産・チラノ繊維、日本カーボン・ニカロン繊維として商品化し量産技術をもつ企業としては世界でこの2社のみである。また、経済産業省の支援の下、1970~2000年代初頭まではCMCの研究開発に投資し、日本の技術力は世界でも先行していたが、事業として成立する規模の市場を見出すことができず、かつ、景気の低迷が重なり政府の支援が細り日本におけるCMC開発は停滞した。この間、多くのプレーヤがCMC開発から撤退したが、IHI、日本カーボン、宇部興産は継続的に開発を進め、技術的に他社をリードしている。

日本が CMC 研究開発で結果的に後塵を拝しているのは研究開発の中断が一因である。今回の CMC 国際会議に参加し、日米欧の出席者と意見交換を通じての感想を次に述べるが、CMC 研究開発の停滞から、研究者の層の厚さの違いは如何ともし難い。

また、日本は航空機エンジンの市場に限られ、CMC の用途がニッチなため、金属との代替で燃料効率向上が見込まれると分かりながらも投資判断が難しい。一方、日本製 CMC に拘らず日本が得意とする SiC 繊維生産に特化するという選択肢もあり得るが、その場合は国内にセラミック繊維産業しか残らない。むしろチラノ、ニカロンに代表される繊維の強みを活かして川上から川下まで含めた産業の競争力を高める方向性を目指すべきと考えるのが妥当である。

米国での研究開発は、いつものように DOD（国防総省）、NASA、DOE（エネルギー省）がリードし、そこで得た技術力を民間転用でビジネスにもつなげるパターンである。特に、米国には最も活発な航空宇宙&防衛市場があり、商業用航空機においても高い需要があるという日米の市場の違いはかなり大きい。CMC は安全保障の観点から非常に重要な技術で、技術力を磨いておければ日本側の交渉力が強まり企業の商機も見えてくる。

（参考）平成 28 年度 製造基盤技術実態等調査 セラミックス関連技術の国際競争力強化に向けた調査検討  
（三菱総合研究所／経済産業省委託調査、2017 年 3 月）

#### （長期的な研究開発の重要性）

日本の優位性を確保するには、米国との対比で CMC の材料・製造プロセスの課題とともに、後加工（機械加工、結合、コーティング、検査等）や構造設計（応力・損傷解析、物性試験、データベース構築等）の課題等について更なる研究開発を進める必要がある。また、今後の CMC タービン部品の低コスト化は、これから本格的に広がる市場で、日本の技術が市場のシェアを取れるポジションになり得る。この地位を確保するには、新しいプレーヤの参入による体制強化と衆知を集めた出口の明確な産学連携の研究開発の充実が求められる。米国は、CMC 研究開発に今後 10 年間で 550 億円を投資することを決めたが、日本においても政府からの組織的な支援が必要である。

現在、CMC 市場が現実化し、2018 年から量産を始める GE 社の動き等、出口も定まってきた。米国の CMC 研究開発は忍耐強く長い年月をかけた帰結として今回の発表につながっている。また、研究開発においてもグローバル化が急速に進展し国際競争が激化する中で、また、中国やインドからの論文発表数が日本や欧州を超えてきており、CMC 研究開発を支える研究開発の増額がないと世界との格差は広がる一方である。ドイツの Fraunher 研究所は、Center for High Temperature Materials and Design（HTL）を強化中で、HTL は複合技術、ポリマーセラミックス、セラミックス及び金属-セラミック複合体の 4 つのグループ



で構成され、更に2つのワークステーション（シミュレーションと材料試験、繊維繊維セラミックス用アプリケーションセンター）をもつ。

<https://www.htl.fraunhofer.de/en.html>

日本のセラミックスは、機能材料が強く構造材料が弱いのは国際的に知られているが、このままでは将来に渡ってCMCの技術を維持続けることができるか、強い危惧を抱かざるを得ないのが、今回の会議出席者の正直な感想である。

#### （新規市場の開発）

研究開発への投資を維持するためには、市場拡大の可能性があると重要で、CMCの特性が求められる航空機エンジンや原子炉材料（米国は2022年の商業化）以外に、新規用途や新市場の開拓が必要である。つまり、当面の出口（航空機エンジン）に加えて、国内に出口が見出せる産業、例えば、産業機械の消耗部品や電気炉の量産部品、CFRP（炭素繊維強化プラスチック）からCMCへの代替などが上げられる。

当面、欧州では高級自動車向け（高級車種にセラミックブレーキを標準装備）、米国では航空機用途がCMC市場を牽引するが、日本はどの分野で当面のCMC市場を牽引していくかの検討が必要である。

また、低コスト化も合わせて議論が必要である。米国では炭素繊維のコスト半減プロジェクト（オークリッジ国立研究所）が成功を収めており、最先端技術だけが国プロでない。

#### （情報共有の推進）

CMCに関連する企業や大学は限られており、継続的な研究開発のために新規参入企業の育成が必要である。そのためには金属などの既存材料と比較してCMCのメリットをユーザにアピールし、認知度を高めていく情報発信が重要である。現在、日本ファイナセラミックス協会は、香川教授とともにCMC関係者のネットワークの構築（CMCコンソーシアム）を検討しているが、これは新たな用途を開拓してくためにも重要な活動となるものである。また、開発が先行している航空機用エンジンとそれ以外の分野の間では情報が共有されにくい現状に鑑み、CMCコンソーシアムは情報共有の拠点となるネットワークとして有益である。これにより全体のポテンシャルを上げるとともに、応用展開も広がりやすくなる。競争と協調を意識しながら、日本全体で一体化して効率を上げ、最新の情報が継続的に入ってくる仕組みを構築しなければ、米国の研究体制には到底かなわない。

会議出席者は、大学ではCMCの試験サンプルが入手しにくく、かつ、高価であると言う。試験片が手に入りにくいことは、大学でのCMC研究を進めていくには致命

的である。また、参入を考えている企業も、CMC 素材の入手が難しければ参入判断が出来ないため、国内で CMC サンプルを製造する機関が望まれる。

#### （人材の育成）

現在 CMC の研究開発に携わっている企業や大学は少ないため、継続的な研究開発及び生産基盤強化のため新規参入の企業や大学の育成、過去 CMC の研究開発をリードしてきた技術者の知見やノウハウを引継ぐ新たな人材の育成が必要である。

開発には複合化プロセスや応用などさまざまな段階があり、それぞれの段階で基礎研究の課題が生まれている。高度な知識を持った人たちが各方面から参画することが必要で、一企業で全てを行うのも難しい。いろいろな分野に特化した企業が必要になってくるため、日本での実用化に向けて若い人たちにどんどん入ってきてほしいと関係者は言う。

また、CMC 関連の学会は日本セラミックス協会、日本金属学会、日本複合材学会、日本材料学会など分散しているため、個別の CMC の学会発表や活動を横断的に連携した場づくりの場の検討が求められる。分散は日本の研究者層の薄さをさらに薄くし、かつ、全体の動きが見えなくなる。海外勢に対抗していくには、そこにいけば全てのが学べる場づくりと関係者の厚い層づくりが必要である。

産学連携、オープンイノベーションが叫ばれて 10 年余り、なかなか大きな成果に結びつかないが、市場を変えるチャンスは、やはりいつの時代も技術で、誰が一番乗りをするかである。CMC では米国が先頭にいることは間違いないが、技術進歩と市場拡大の速い時代、JFCA が標榜する「セラミックスの新しい時代は、いつも日本か」を期待し、三人寄れる場を設け三人の知恵が重なるように JFCA としても努力したい。

#### （最後に）

サンタフェに到着した日は夏時間から冬時間に変わる前日で、翌朝にはドアノブに時間切り替えの案内紙が置かれていた。日曜日は 3 万人が参加するニューヨークマラソンで朝からホテルでテレビの実況中継を観戦。この時期、米国ではカレッジフットボールのシーズンで、複数のテレビが毎日放映。アメリカの四大スポーツは、①フットボール、②ベースボール、③バスケットボール、④アイス ホッケーで、4 種目のプロリーグがある都市（13 市のみ）は都市の誇りでステイタスである。

今回、2 度目の晩秋のサンタフェであったが、11 日はベテランズデー（退役軍人の日）、23 日はサンクスギビングデー、（感謝祭）、12 月はクリスマスと続き年の瀬も近くなってきた。

最後に、今回の出張にあたっては、東京工科大学CMCセンター及び米国空軍科学技術局アジア事務所(東京)にお世話になり深く感謝を表したい。



晩秋のサンタフェ (東京工科大・七丈先生撮影)

END