

本田財団レポート No. 155

第 35 回本田賞授与式 記念講演 (2014 年 11 月 17 日)

「技術革新の成長と限界における材料の役割」

レオーベン鉱山業大学 金属物理・材料試験学部長

ヘルムート・クレメンズ博士

The role of materials in progress and limit of technological evolution

Commemorative lecture at the 35th Honda Prize
Award Ceremony on the 17th November 2014

Dr. Helmut Clemens

Head of the Department of Physical Metallurgy and Materials Testing at the
Montanuniversität Leoben, Austria

公益財団法人 **本田財団**
HONDA FOUNDATION

ヘルムート・クレメンズ博士

レオーベン鉱山業大学(オーストリア)金属物理・材料試験
学部長

Head of the Department of Physical Metallurgy and
Materials Testing at the Montanuniversität Leoben,
Austria

Dr. Helmut Clemens



■ 生まれ

1957年7月26日 クラーゲンフルト ケルンテン州
オーストリア生(オーストリア国籍)

■ 学 歴

1983年 レオーベン鉱山業大学材料科学科
修士課程修了
1987年 レオーベン鉱山業大学材料科学科
博士課程修了(工学博士)
1997年 レオーベン鉱山業大学金属間材料の大学
教員資格(博士課程後の講義資格)取得

■ 職 歴

1987年～90年 レオーベン鉱山業大学 物理学部にて
研究助手
1990年2月 プランゼー株式会社
～97年2月 「金属間材料」研究開発グループ長
1997年3月 シュトゥットガルト大学
～2000年6月 金属物理学研究所 教授
2000年7月 ヘルムホルツ・センター、ゲーストハッハト
～03年6月 (Helmholtz-Zentrum Geesthacht)
材料研究所所長 「金属物理学」「新材
料」「中性子の活動」という研究領域の
責任者を務めるかたわら、クリスティアン・
アルブレヒト大学キールの教授も兼任
2003年7月 レオーベン鉱山業大学 教授 金属物理・
～現在 材料試験学部長

■ BORN

July 26, 1957 in Klagenfurt, Carinthia, Austria
(Austrian citizenship)

■ EDUCATION AND TRAINING

1997: Habilitation (Postdoctoral Lecture Qualification).
Subject: Intermetallic Materials; Montanuniversität
Leoben
1987: Ph.D. (Dr. mont.), Montanuniversität Leoben,
Materials Science
1983: M.S., Montanuniversität Leoben, Materials Science

■ EMPLOYMENT HISTORY

Montanuniversität Leoben, Professor, Head of the Department of
Physical Metallurgy and Materials Testing, 7/2003 - present.

Helmholtz-Zentrum Geesthacht, Head of the Institute for Materials
Research. Responsible for the areas "Metal Physics", "New
Materials" and "Neutron Activities" in a joint appointment as
Professor at the Christian Albrechts University of Kiel,
7/2000-6/2003.

University of Stuttgart, Professor, Institute of Physical Metallurgy,
3/1997-6/2000.

Plansee AG, Head of the R&D group "Intermetallic Materials",
2/1990-2/1997.

Montanuniversität Leoben, Research Assistant at the Department
of Physics, 1987-90.

■略 歴

ヘルムート・クレメンズ博士は構造用金属間化合物材料の分野において、国際的に最も高名な専門家の一人で、 γ -TiAl 基合金と呼ばれる軽量チタンアルミ金属間化合物に重点を置いた研究をしています。TiAl 合金の最も重要な利点は、現在使われているニッケル基超合金と比べて重量がほぼ半分であることです。クレメンズ博士の研究グループと彼の産業界のパートナーによって開発された合金および加工技術は、次世代環境対応燃焼エンジンの開発を実現するための重要な要素として考えられており、この合金はエンジン内の重い超合金の部分的代替を可能にします。クレメンズ博士は、レオーベン鉱山業大学（オーストリア）金属物理・材料試験学部長を務めており、その科学分野における業績に対し、1983年にレオーベン鉱山業大学の修士論文学長賞（Rektor-Platzer-Ring）、1995年にドイツ材料科学学会のゲオルク・ザクス賞（Georg-Sachs Prize）、2006年にオーストリア産業連盟の産業による大学研究賞、2010年にB&C財団（オーストリア）のヴォルフガング・ホースカ賞（Wolfgang-Houska Prize）など、多数の賞を受賞しています。

■主な出版物

Advanced Intermetallic TiAl Alloys:

(with S. Mayer), Advanced Engineering Materials, Review Article, 2012.

Technology and Properties of Advanced γ -TiAl Based Alloys:

(with several co-authors), Int. Journal of Materials Research and Advanced Techniques, 2009.

Neutrons and Synchrotron Radiation in Engineering Materials Science:

(edited with W. Reimers, A.R. Pyzalla and A. Schreyer), Wiley-VCH, Weinheim, Germany, 2008.

Gamma Titanium Aluminides 2003:

(edited with Y-W. Kim and A.H. Rosenberger), TMS, Warrendale, USA, 2003.

■BIOGRAPHICAL SKETCH

Helmut Clemens is one of the internationally most renowned experts in the field of structural intermetallic materials, with particular focus on light-weight titanium aluminides, so-called γ -TiAl based alloys. The most important advantage of TiAl alloys is their almost half specific weight, when compared to the presently used Nickel-base superalloys. The alloys and processing technology developed by the research group of Dr. Clemens and his industrial partners are considered as key elements to be used in the next generation of eco-friendly combustion engines, where they partly replace heavy superalloys. Dr. Clemens is the Head of the Department of Physical Metallurgy and Materials Testing at the Montanuniversität Leoben in Austria. For his scientific contributions, Dr. Clemens was awarded the Rektor-Platzer-Ring of the Montanuniversität Leoben in 1983, the Georg-Sachs Prize of the German Society of Materials Science in 1995, the University Research Award of the Industry of the Austrian Industrial Society in 2006, and the Wolfgang-Houska Prize of the B&C Foundation, Austria, in 2010, among others.

■MAJOR PUBLICATIONS

Advanced Intermetallic TiAl Alloys:

(with S. Mayer), Advanced Engineering Materials, Review Article, 2012.

Technology and Properties of Advanced γ -TiAl Based Alloys:

(with several co-authors), Int. Journal of Materials Research and Advanced Techniques, 2009.

Neutrons and Synchrotron Radiation in Engineering Materials Science:

(edited with W. Reimers, A.R. Pyzalla and A. Schreyer), Wiley-VCH, Weinheim, Germany, 2008.

Gamma Titanium Aluminides 2003:

(edited with Y-W. Kim and A.H. Rosenberger), TMS, Warrendale, USA, 2003.

技術革新の成長と限界における材料の役割

ヘルムート・クレメンス



Honda Prize 2014 Commemorative Lecture

The role of materials in progress and limit of technological evolution

Helmut Clemens

Department of Physical Metallurgy and Materials Testing
Montanuniversität Leoben
Roseggerstraße 12
A-8700 Leoben, Austria



Honda Prize 2014 Commemorative Lecture

My sincere thanks go to

- Mr. **Hiroto Ishida**, President of the Honda Foundation,
- The **Selection Committee**
- Mr. **Fumihiko Ike**, Chairman and Representative Director, Honda Motor Co., Ltd.
- Dr. **Bernhard Zimburg**, Ambassador of the Republic of Austria to Japan
- Mr. **Satoshi Matsuzawa**, Managing Director of the Honda Foundation

皆様、本日の講演は、「技術革新の成長と限界における材料の役割」というテーマでお話をさせていただきます。

お集りの皆様全員が材料科学に関する背景知識をお持ちではないと思いますので、できる限りわかりやすい講演にしようと準備をしました。しかし大学の教員をつとめる私と致しましては、60分後には皆様全員が学識ゆたかな材料のエキスパートになり、また技術の進歩や人類の歴史に材料がいかに重要な役割を果たしているかについて、ご理解いただけることを願っています。

講演に先立ちまして、私にこのような栄誉を与えてくださった本田財団に御礼を申し上げます。本田賞を受賞するという、ひいてはこの輝かしい伝統の一部になるということは、私の科学者としての人生のハイライトとなる出来事です。このような盛大なる授与式や素晴らしいゲストの皆様のことを、決して忘れる事はないでしょう。

私の科学的業績を評価し、受賞者に選定してくださった本田財団理事長の石田寛人様、そして選考委員会の皆様に、深く御礼申し上げます。

また、本田技研工業株式会社代表取締役会長の池史彦様にも、感謝申し上げます。

また、この素敵な授与式にご出席くださり、妻と私に故国の温もりを届けてくださった、駐日オーストリア大使のベルンハルド・ツィムブルグ閣下にも感謝致します。

また、貴重なお時間を割いてこの特別な式にご出席いただいた、素晴らしいゲストの皆様にも感謝致します。

最後になりましたが、本田財団常務理事の松澤聡様とスタッフの皆様の思いやり、組織としての見事なご対応、行き届いたきめ細やかなサポートに対して、心より感謝致します。

そして、授与式にご列席下さったすべての皆様、本当にありがとうございます。

この講演では、本田財団のエコテクノロジーというコンセプトに非常に良く合致する、すなわち先進技術によって我々の環境を保護・保全するための、私と共同研究者による研究内容についてご説明しようと思います。

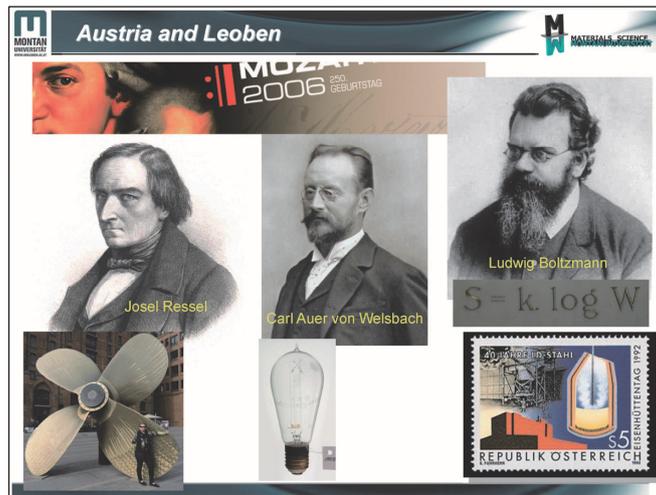


図-1

〈図-1〉 オーストリアは小さな国ですが、世界的に著名なオーストリア人は数多くいます。ウォルフガング・アマデウス・モーツァルトとその音楽作品は、その一例です。もし彼の音楽がお好きでなければ、「モーツァルトクーゲル」と呼ばれている美味しいお菓子があります。そしてこれが、先進材料のコンセプトを説明するために私が紹介する、一つ目の実例なのです。お菓子を真っ二つに切ってみると、甘味料の層でできていることがわかります。食べてみると様々な成分が口のなかで溶け合い、特別な味が生み出されます。このように異なる技工物の層によって構成される材料のことを、複合材料と呼びます。現代において複合材料は、様々な技術分野に応用されているのみならず、スポーツ用品にも用いられています。

ここで、モーツァルトほど有名だとはとても言えませんが、我々の社会の発展に多大なる影響を与えた発明をしたオーストリア人達をご紹介します。

この人物（左）の名前をご存知の方はいらっしゃるでしょうか。彼の発明は、大型船造船業の存在する日本にとって、とくに重要です。彼の名はヨーゼフ・レッセルといい、船用プロペラの発明者です。驚かれるかも知れませんが、魚雷もオーストリア人の発明なのです。この兵器の開発は、オーストリアが海軍を保持していた時代にまでさかのぼります。

次にご紹介するのは、電灯照明における変革をもたらした人物です（中央）。彼の名はカール・アウアー・フォン・ヴェルズバッハ。電球を発明したのはトーマス・エジソンでしたが、彼はフィラメント材料として初めて高融点金属を導入しました。金属フィラメントは、電球の寿命を飛躍的にのばしました。新たな材料が技術の進歩・革新をどのように決定づけるのかということを示す一例であるこの発明は、世界中を明るくしただけでなく、タングステンやモリブデンといった高融点材料の研究活動に火をつけました。大量の耐熱金属に対する高い需要に応じて、粉末冶金という新技術が開発されました。二十世紀初頭、高融点材料の製造会社が世界中に設立されました。例えばオーストリアでは、いまだに粉末冶金の分野において代表的な企業であるプラ

ンゼーが設立されました。プランゼーで八年近く働いたことを、私は誇りに思っています。私はその時期に、チタンアルミナイド金属間化合物の研究を開始したのです。

次にご紹介したいオーストリア人の科学的業績は、物理学と材料科学の両方に大きな影響をおよぼしました。彼の名はルートヴィッヒ・ボルツマンといい（右）、その主な業績は墓石にも刻まれています。「S」の文字によって示されるエントロピーとは、熱力学において、重要な状態変数です。例えば熱力学計算は、複合材料システムの状態図の制定に用いられます。言うまでもなくこれは、材料開発において重要な技術です。

最後に、製鋼の世界に革命を起こした LD プロセスという発明をご紹介します。L は Linz というオーストリアの都市、D は Donawitz というレオーベンの一地域を指しています。レオーベンは、私の大学の所在地でもあります。

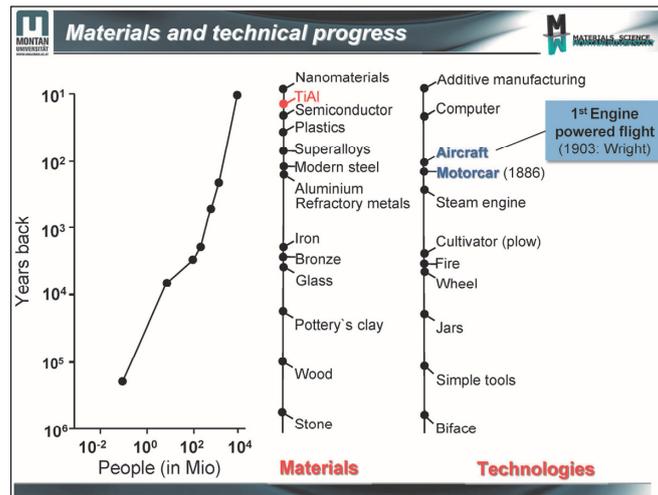


図-2

〈図-2〉 このスライドは、世界人口の増加の様子を示しています。過去 200 年間で、爆発的に伸びているのがわかります。

スライドの右側では、人類の技術的進歩がどのように材料によって決定づけられたかをご説明しようと思います。

最初に作られた道具は、石と木を用いたごく単純なものでした。しかしこれにより人類は、他の動物のみならず、そのような発展段階に達していない他の人類に対しても優位に立つことができたのです。例えばかめを作ることによって、食物や液体を貯蔵することができました。

車輪の発明と使用によって、「モバイル（移動可能な）」社会への最初の大きな一歩が踏み出されました。もう一つの大きな飛躍は、冶金学が創始されたことです。さまざまな金属やその合金を量産することが初めて可能になったのです。そのためには、還元加工や溶融作業をおこなうのに十分な高熱を得られる、火炉の建設が必要でした。耕耘機の発明により、定住社会に向かっての第一歩を踏み出しました。

アルミニウム・耐熱金属・近代鋼・超合金などいわゆる近代材料の開発により、我々の社会は決定的に変化しました。近代材料は、蒸気機械・自動車・航空機などの新たな発明の実現には不可欠でした。言うまでもなくこれらの発明品は、初めて市場に登場して以来、その姿を変え続けてきました。

例えば、エンジンを動力とする最初の飛行が行われたのは、1903 年です。航空機の重量は、約 340 kg でした。今日、満載のエアバス A380 の質量は、約 600 トンになります。航空機とエンジンについては、後ほどより詳しくお話ししましょう。

高分子材料が開発されると、人間社会は「プラスチック時代」に突入し、同時に様々なメリットやデメリットを抱えることになりました。

しかし、機能材料と呼ばれる材料の特性が発見されたのは、わずか数十年前のことです。最も有名なものが、半導体やトランジスタの基盤に用いられるシリコンです。半導体技術は、情報を基礎とし、情報に依存する社会へと人間社会を変化させたコンピューター技術の礎となり、さまざまな面においてリミットのない社会を作り出しました。さて、体内に埋め込まれたマイクロチッ

プを介して人間の脳細胞がコンピューターと直接コミュニケーションをとれるようになるまでには、どれくらいかかるのでしょうか？

1970年代には、チタンアルミナイド金属間化合物が初めて高温用途における革新的な材料であると見なされたのですが、この話題についてはまた後ほどお話ししましょう。

今日において、ナノ材料というコンセプトが世界の研究活動の主流となりはじめています。例えば自己組織化システムが医学分野における薬物送達に応用されるなど、すでに数多くの成果があがっています。

最近の十年では、積層造形などの新しい加工技術が市場に導入されました。こうした技術によって、複雑な金型を使用せず、プレアロイ粉から用途に最も適した部品を生産することができるのです。

このように、材料がかなりの部分まで技術的進歩の限界を決定付けていることは明らかです。

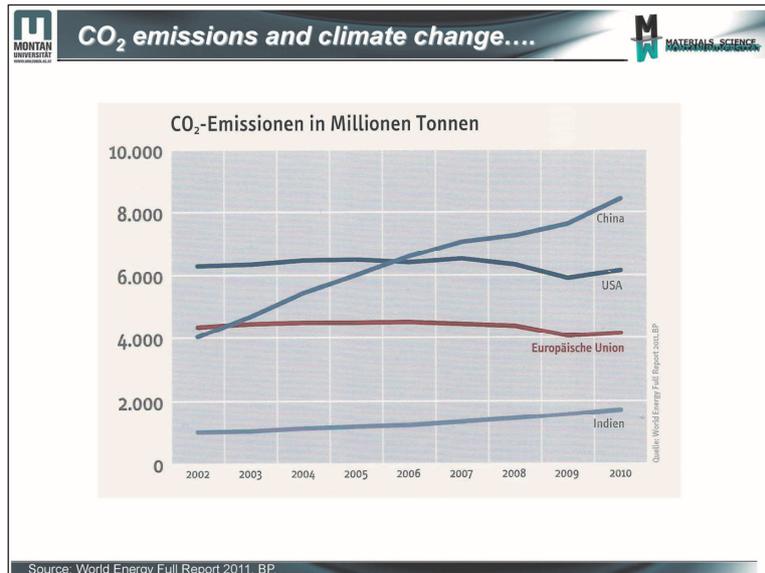


図-3

〈図-3〉 地球規模における大気中の二酸化炭素濃度の増加は公害の中でも深刻なものです。このグラフをご覧いただくと、EU、さらに米国さえも二酸化炭素排出量を一定量に保つことに成功している一方、中国とインドにおける排出率は増加しつづけていることがわかります。しかしながら、二酸化炭素排出は、地球の気候変動を引き起こす国境を越えた課題なのです。

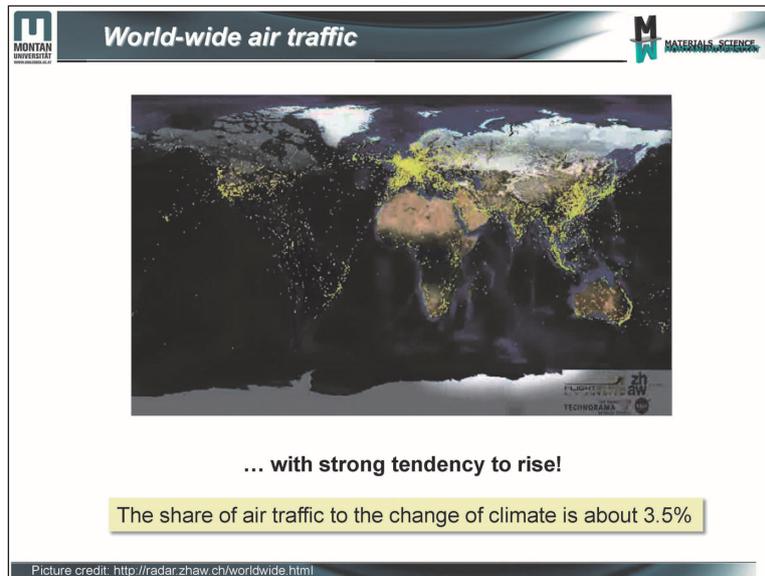


図-4

〈図-4〉 このスライドは、世界における毎日の航空交通の様子を示しています。わけても航空交通量は今後何年かの間で、劇的に増加するという強い傾向を示しています。この動画における黄色い点の一つ一つは、運行中の航空機を表しています。

航空交通が気候変動におよぼす影響は、約 3.5%であると推定されています。

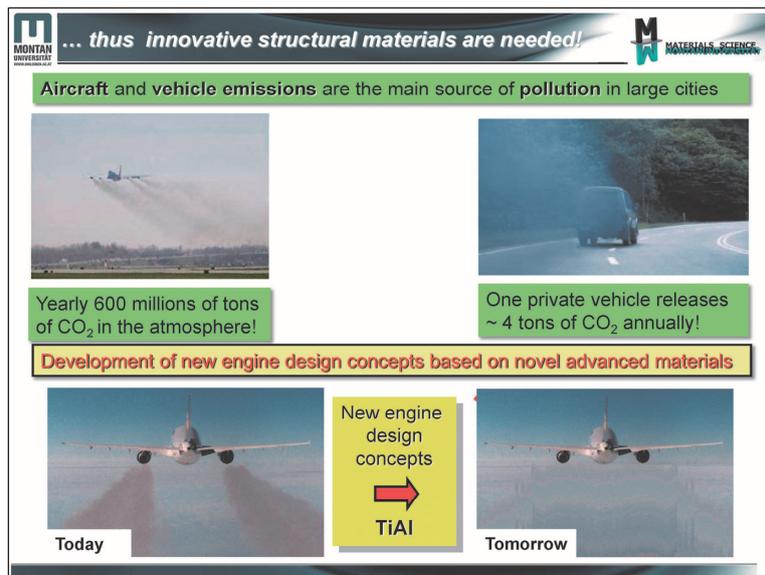


図-5

〈図-5〉 大都市における大気汚染の主な原因は、航空機や自動車による排気ガスです。毎年6億トンを超える二酸化炭素が航空交通により生み出される一方、クルマ一台の排出量はずっと少ないものです。しかし、その数字を巨大都市を走る車の数に掛け合わせてみると、恐ろしいほどの二酸化炭素排出量が導き出されます。

排出された二酸化炭素はいわゆる温室効果の一因となり、地球温暖化へとつながります。もし人間が温暖化を食い止めることができなければ、両極の氷冠が溶け、将来的にニューヨーク市は水没してしまうでしょう。

しかし、我々に何ができるのでしょうか。航空機の飛行や車両の運行を禁止するというのは、現実的な解決策とは言えません。我々に必要なのは、チタンアルミナイド金属間化合物のような新しい先進材料に基づく、新しい航空機エンジンのためのコンセプトを開発することなのです。コンピューターを使えば簡単です。ほんのワンクリックで、低排出ガスの航空機を設計することができます。実際には、長年にわたる非常な労力と費用をとまなう研究開発が必要なのですが。



図-6

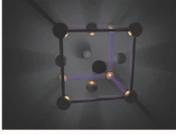
〈図-6〉ところで、金属間化合物とは何なのでしょう？この写真を使って、もっとも特徴的かつ重要な特性についてご説明します。私は、「アトミウム」というものの前に立っています。これはオリジナルではなく縮小モデルで、私の生まれたクラゲンフルト市にあります。この「アトミウム」はいわゆる体心立方構造を示す、金属の結晶格子を表しています。

これら全ての原子がチタン原子だと想像してみてください。すると、チタンのベータ変態と呼ばれる結晶構造が得られます。例えばそのチタンに少量のアルミニウム原子を加えると、チタン合金を含んだアルミニウムが得られます。このアルミニウム原子は、格子中のどこにでも位置することができます。

しかしながら、チタン原子とアルミニウム原子の濃度を同じにすると、金属間相と呼ばれるものが形成されます。重要な特性のひとつはこの秩序化された結晶構造であり、あらゆるタイプの原子には、位置するべき特定の場所があるということを意味しているのです。この例ではチタン原子は角の部分に位置しており、アルミニウム原子は格子の中心に位置しています。この金属間相を、特に秩序化 β_0 -チタンアルミナイドと呼びます。

Characteristics of intermetallic materials

Ordered crystal structures due to strong bonding forces between the different metal atoms



↓

Unique mechanical properties

- high Young's moduli, high-temperature strength retention

High thermal conductivities

- higher than engineering ceramics ⇒ higher cooling efficiency and lower thermal stresses

“Ceramic” behaviour at room temperature -
 “metallic” behaviour at elevated temperature

- low (TiAl) or no (NiAl) ductility at room temperature
- some intermetallics (TiAl) can be processed using conventional metallurgical methods ⇒ economically competitive

図-7

〈図-7〉 構造的金属間材料の一般的な特徴とはどんなものでしょうか？

先ほどのスライドでお見せしたように、金属間材料は異なる種類の金属原子間における強力な結合力に起因する、秩序化された結晶構造を示します。

結果として、高温環境においても高い弾性係数および強度を持ちます。

エンジニアリング・セラミックとは対照的に、金属間化合物は高い熱伝導率を有するため、高い冷却効率を必要とする部品に使用する事が出来ます。

一般に金属間材料は、室温においてはセラミックに類似した挙動を示しますが、高温環境においては金属のもつ性質を示します。このことは、室温環境での延性は限られている一方、高温環境におけるチタンアルミナイド等の金属間材料は、従来の冶金法によって加工可能であり、経済的な競争力もあるということを意味しています。

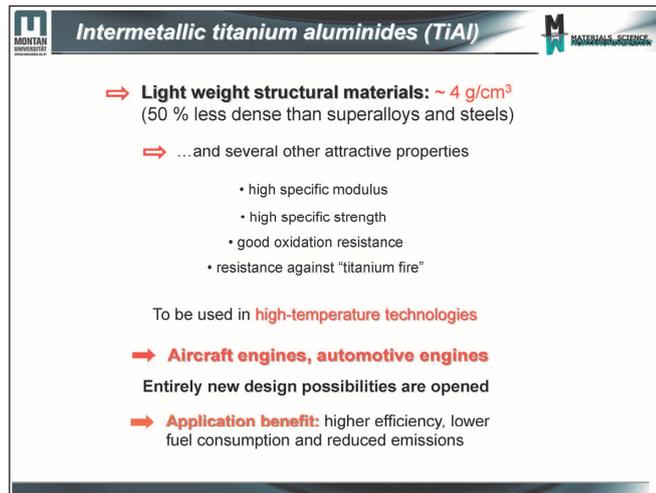


図-8

〈図-8〉 ではこれから、私が本年度の本田賞をいただくきっかけとなった、チタンアルミナイド金属間化合物のきわめて優れた特性の数々について見ていきましょう。

もっとも重要な特性は密度の低さで、超合金や鋼よりも約 50%低密度です。まさにこの特性によってチタンアルミナイドは、高温軽量設計用材料の候補として注目されているのです。

低密度性の他にも、以下のような注目すべき特性を備えています。

- 高い比弾性率。「比弾性」とは、弾性率を材料の質量密度で割ったもの。
- 高い比強度。
- 優れた耐酸化性。
- いわゆる「チタン火」への耐性。

これら全ての特性を組み合わせることにより、航空機および自動車エンジン設計の新たな可能性が開かれます。

導入することで、高効率性、低燃費、排出量の持続的低減という恩恵が得られます。

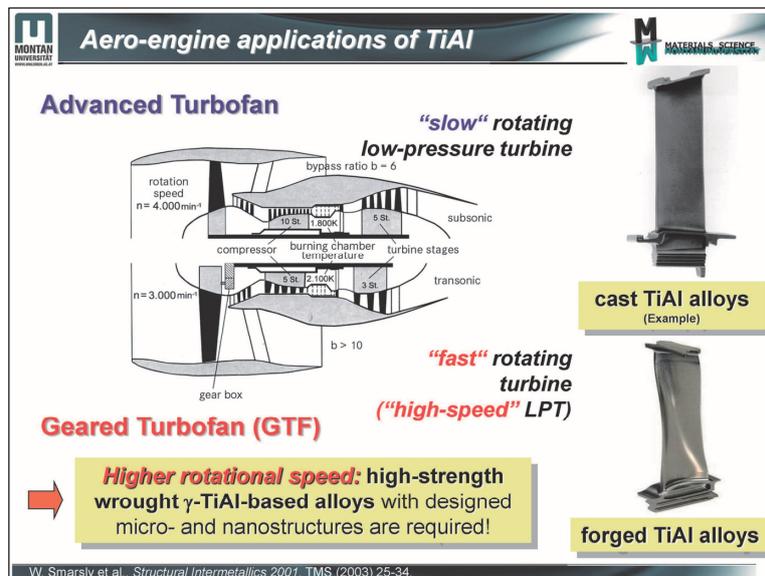


図-9

〈図-9〉 これらの特性を鑑みれば、チタンアルミナイド金属間化合物の応用領域は、明らかに自動車および航空機エンジンであると言えます。ところで、チタンアルミナイドを初めて採用したのは日本でして、それは1999年のことでした。三菱自動車は当時、ランサーエボリューションVIのターボチャージャーに、チタンアルミナイド製鋳造タービンホイールを搭載していたのです。

しかし、航空機エンジン分野への応用はさらに困難なものでした。この概略図の上半分が示しているのは、先進ターボファンの従来のエンジン構造です。航空機がゲートに到着したとき通常皆さんが目にする巨大なファンブレードは、エンジンの一部になっています。ジェットエンジンの作動モードを理解するのは、難しいことはありません。入ってきた空気は、圧縮器部分において圧縮されます。そして圧縮された空気はケロシンが注入される燃焼室へと入ります。燃焼ガスが膨張しつづけることにより、高圧タービンと低圧タービンが駆動します。先進ターボファンのような従来のエンジン構造では、ファンと低圧タービンは、同じシャフト上に搭載されています。低圧タービンは比較的回転速度が遅く、温度も低いために、この部分には鋳造チタンアルミナイド製ブレードを使用することが可能です。一例としては、ゼネラル・エレクトリックのGEnXエンジンがあります。2011年のことで、低圧タービンの最終段に鋳造チタンアルミナイド製タービンブレードを使用した、最初の航空機エンジンでした。ご覧のようにこの種のタービンは、段の数が多いのが特徴です。

図の下半分に描かれているのは、プラット・アンド・ホイットニーの「ギヤードターボファンエンジン」、あるいはGTFと呼ばれるエンジンです。従来のエンジン構造とは対照的に、「高速」低圧タービンと呼ばれる、高回転のタービンを搭載しています。

MTU エアロ・エンジンズ（ミュンヘン、ドイツ）が開発したこの先進的なタービンコンセプトのおかげで段数が減り、そのため部品点数が減ったために、推進システムは従来のエンジンより

も遥かに軽くなりました。しかし回転が速くなったせいで、ギアボックスをファンと低圧タービン間に設置しなければならなくなりました。これはそれぞれの部品が異なる速度で回転することになり、ひいてはシステム全体の高効率性へと繋がる、ということの意味します。

しかしながら、機械的応力が増し、高温にもなるため、鑄造チタンアルミナイドブレードは使用することができません。このような使用条件のために、微細構造・ナノ構造設計の、高強度鍛造タービンブレードが求められているのです！

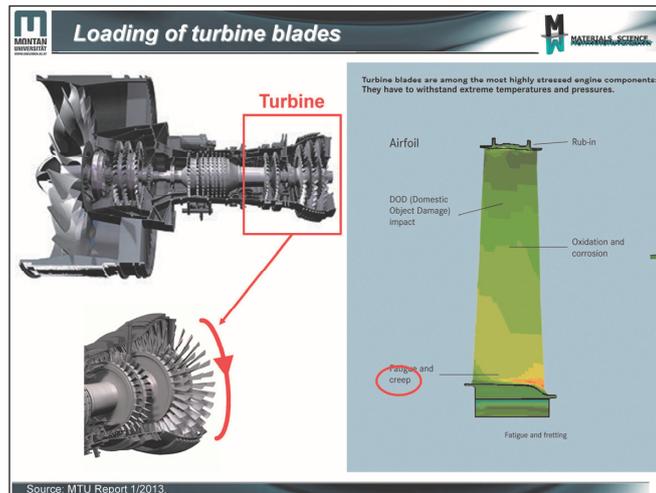


図-10

〈図-10〉 タービンブレードは、もっとも高い応力のかかるエンジン部品です。超高温・高圧に耐えねばなりません。

この非常に高い機械的応力について、簡単な例によってご説明します。タービンの回転中、ブレードには遠心力が働いています。この力は、大きな車の重量に相当します。問題は高応力だけではありません。燃焼室からくる高温ガスも高い圧力を有し、タービンブレードを一定の温度まで上昇させます。この機械的応力と温度により、クリープと呼ばれる現象が起こります。クリープ現象の結果として、回転中のブレードが変形し始めます。簡単に言えば、ブレードが伸長し始めるのです。したがってタービンブレードに使われる材料には、安全な耐用年数を確保するために、伸長を最小限にとどめる高いクリープ耐性が求められます。

さらに、ブレードの材料には、酸化や腐食に対する耐性もなければなりません。

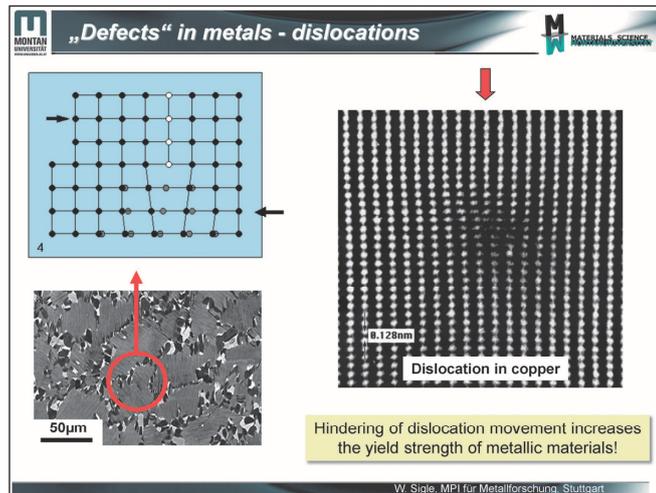


図-11

〈図-11〉 材料の強度は、決定的に重要な特性の一つです。したがって我々は、金属の強度と塑性変形能を決定しているのは何なのかについて、問わねばなりません。この問いに答えるためには、材料の微細構造を見てみる必要があります。この画像は、走査電子顕微鏡によって撮影された、チタンアルミナイド合金の微細構造です。それでは結晶格子の原子レベル構造が見えるまで、拡大してみましょう。明らかに何かが違います。結晶格子の局所的対称性が損なわれているからです。もっとよく見てみると、赤線で示しているように、格子に対して原子の余分な面が挿入されていることがわかります。材料科学者はこの欠陥を、転位と呼んでいます。このように非常に小さなサイズの欠陥をなぜ取り上げる必要があるのか、疑問を持つ人もいるでしょう。答えは、これらの小さな欠陥が、塑性体の挙動と金属材料の強度を左右しているからです。現時点においては、この転位という現象の存在なくして圧延・鍛造・延伸による金属の成形は事実上不可能なこともある、ということを強調したいと思います。金属というものは、極端に強靱になり得るのです！

材料に一定の応力をかけると、転位は移動し始め、材料が塑性的に変形し始めて、形体を変化させます。塑性変形を起こすために必要な応力のことを、降伏応力と呼びます。転位が単なる理論上のモデルではないことの証拠として、この透過型電子顕微鏡写真は、銅における転位の様子をとらえています。

これで、材料の降伏強度を上げるにはどうすればよいのかが明らかになりました。転位の移動を妨害する方法を探る必要があるのです。



図-12

〈図-12〉 受付でペーパークリップを渡されたときには、皆さん驚かれたのではないかと思います。材料科学者である私にとって、実験はお手のものです。ここで皆さんにも私と一緒に、実験に参加していただきましょう。

ペーパークリップをお手に取っていただき、真っすぐに伸ばしてください。そうすると、ほぼ真っすぐになった針金には、変形していない部分が三ヶ所できます。

これから、三点曲げ試験と呼ばれるものを行います。針金の中央の真っすぐな部分をつまみ、私のやるように曲げてください。ごくゆっくり曲げていただき、そうして塑性変形を起こすために必要な力を「計測」してください。

それが終わったら、針金をまたゆっくりと曲げ、真っすぐに戻してください。ここでも、加えた力を測ってください。

それでは実験の評価に移りましょう。皆さんの結果はいかがだったでしょうか。

曲げ戻すのに要した力のほうが大きかった方は、実験成功です！最初の変形によって、材料が強固になったということは明らかです。

このような挙動の理由を、コンピューターシミュレーションによって説明します。ご覧いただいているのは、このようなペーパークリップの針金の断面図です。針金が塑性変形を始めるとすぐに、材料内部において、このシミュレーションでは複数の線によって表現されている、大量の転位が形成されます。これらの転位は、互いに妨害し合うことにより、材料を強化します。針金が曲げ戻されるとさらなる転位が発生し、金属製ペーパークリップ材料の強度はさらに高まります。

このように冷間変形によって金属材料を強化するという技術は数千年前から知られており、いまだに金属加工業界において用いられています。今日ではこの工程をひずみ硬化、もしくは加工硬化と呼んでいます。

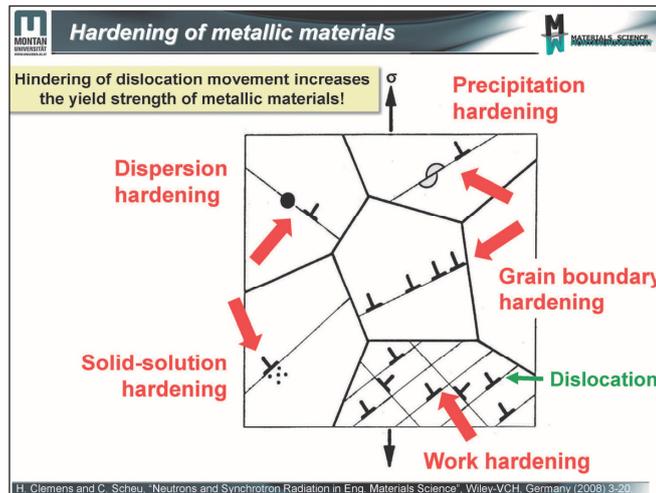


図-13

〈図-13〉 金属材料の強度を上げるために材料科学者が用いることのできるものは、どの概念でしょうか？この多結晶微細構造の概略図には、実用可能なあらゆる強化手法（強化メカニズム）が示されています。すべての手法は、転位の移動を妨害するという考え方に基づいています。

強化手法の一つについては、皆さんはすでにご存知です。移動の際お互いに妨害し合うような転位の形成に基づく、加工硬化です。

もう一つは、粒子のサイズを小さくすることにより、転位の障壁となる粒子境界の数を増やすことです。この手法は多くの細粒鋼に用いられています。

すべての工業用合金に用いられている非常に重要な強化概念として、固溶体硬化があります。合金原子の直径は、母材の原子と比較して大きい小さいのが通例です。結果として応力場が生じ、転位の応力場と相互作用します。

特に高温材料において利用することができる二つの非常に重要な手法として、析出硬化と分散硬化があります。これらの手法では、非常に微細かつ均一に分布した粒子によって、転位の移動を阻みます。

これら全ての機構は、チタンアルミナイド金属間化合物の強化にも用いることができます。しかしながら、全ての概念が高温に適しているわけではなく、強度を高めることは、特に室温環境における延性の低下をももたらす、ということに留意する必要があります。

特に、もともと室温における延性が限られているチタンアルミナイドに関しては、バランスのとれた機械的特性、すなわち室温において十分な変形能をもち、かつ高い強度を備えた合金を開発することは容易ではありません。

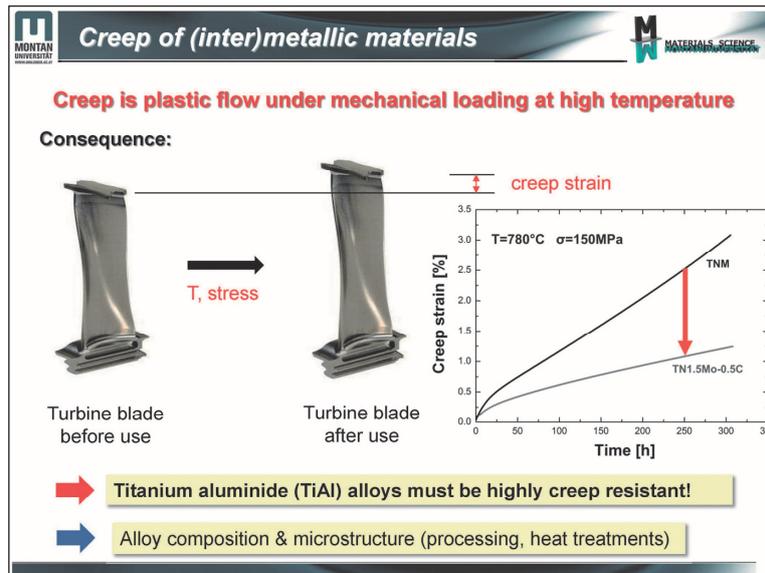


図-14

〈図-14〉 先のスライドにおいて、金属部品が高い応力と温度にさらされる時、クリープ現象が深刻な問題となる、ということについてご説明しました。

例えばタービブレードは、ご覧いただいているようになります。もちろん形体の変化については、かなり誇張していますけれども。

これは、製造後のタービブレードです。エンジン内において何千時間にも渡って使用されるにつれ、クリーププロセスが発生し始め、タービブレードの伸長が起こります。この伸長を、クリープ歪みといいます。クリープ現象の挙動は試験片によって計測可能で、いわゆる「クリープ曲線」の例が、スライドの右側に示されています。安全な使用のためにはクリープ歪みを最小限に止めねばならず、したがってチタンアルミニド合金は高いクリープ耐性を持たねばならないことは明らかです。クリープ特性は、合金の組成と微細構造によって決まります。合金の組成を適切に変えることにより、どれほど効果的にクリープ歪みを減少させることができるのかがお分かりいただけるとと思います。

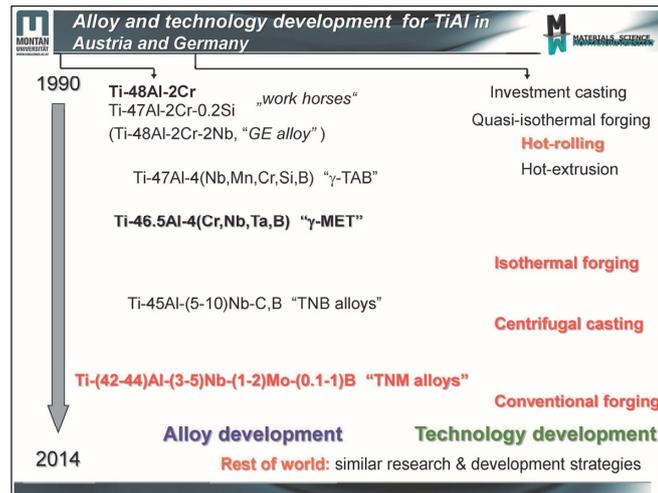


図-15

〈図-15〉 ここでは、オーストリアとドイツにおけるチタンアルミナイドの合金及び技術開発についてまとめました。しかし世界のその他の国々も、同様の開発戦略をとりました。

90年代初頭、80年代に発明された「ゼネラル・エレクトリック」合金と非常に類似した単純な合金を使用しての開発がスタートしました。しかしこの合金は30年近く後になって、GENxエンジンの鋳込材料として採用されることになりました。

プランゼーで働いているとき、私はGamma-Met合金を開発しました。この中強度合金はシートメタル用として開発されましたが、90年代末にはF1エンジンのバルブ材としても使用されました。

それから、合金開発が集中的に行われる時期を迎えます。室温での延性を保ちつつ、チタンアルミナイドの強度を飛躍的に高めることが目標でした。

これに関連して、GKSS研究センター（ゲーストハッハト、ドイツ）におけるフリッツ・アペル博士とその研究チームの先駆的な業績について触れたいと思います。彼は高強度チタンアルミナイドを作り出すために、ニオブウムの含有量を増やし、少量の炭素を加えることを行った最初の研究者の一人でした。

我々がTNM合金の開発を開始してから、まだ10年も経っていません。Tはチタンアルミナイド、Nはニオブウム、Mはモリブデンを示し、この合金の主要な合金化元素です。経済的にタービンブレードを鍛造でき、なおかつ熱処理によってバランスのとれた機械的特性、すなわち高温での高強度と室温での十分な破壊歪みを有する合金を開発することが目標でした。当時のビジョンは、まもなく高効率の航空機エアバス320neo、に動力を供給する必要があるエンジンにこの材料を使うことでした。neoはNew Engine Optionのことです。

現在チタンアルミナイドに適用可能な加工技術については、次のスライドにまとめました。

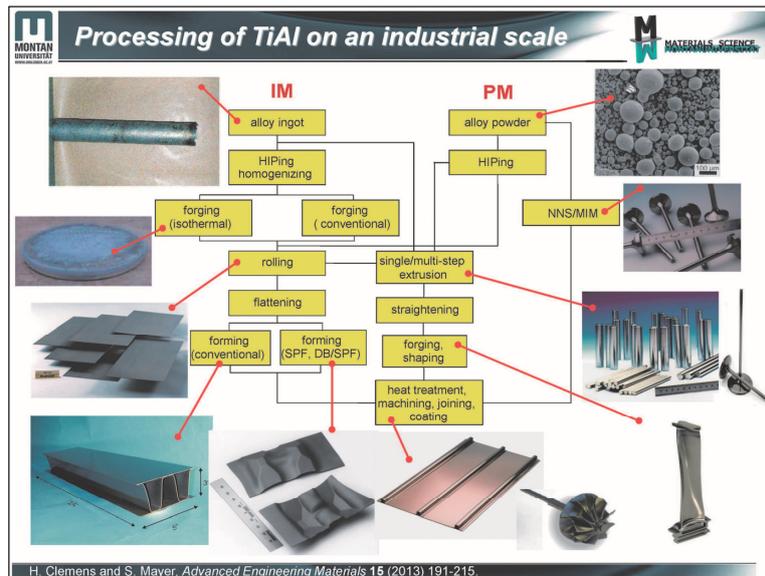


図-16

〈図-16〉 このスライドは、世界中の先進工業国において開発されてきた、産業規模におけるチタンアルミナイドの加工ルートを示しています。実のところ、チタン合金に使用されている技術の全ては、金属間材料の個々の特性に合わせることで使用可能です。

ご覧のように、インゴット材料や高密度合金粉を始めとして、圧延や押出、また鍛造といった加工を行うことが可能です。さらに、接合や機械加工に関する技術も開発されました。とくにチタンアルミナイドを鋼や超合金など他の材料と結合させねばならない場合、接合技術が重要となります。実用が難しかった例としては、タービンホイールをスチールシャフトと結合させねばならないターボチャージャーへの使用が挙げられます。

鍛練加工ルート以外では、ターボチャージャーホイールおよびタービンブレードなどのチタンアルミナイド製部品のために、ニアネットシェイプという鑄造法が開発されました。代表的な企業としては、様々な用途の鑄造ターボチャージャーホイールを初めて製造した大同特殊鋼（株）があります。

こうした技術に興味がおありで、より詳しい情報をお知りになりたい方は、この講演の印刷テキストをご覧ください。すべての技術について詳しく説明している、最近のレビュー記事が掲載されています（英文のみ）。



図-17

〈図-17〉 私がチタンアルミナイド金属間化合物と出会ったのは、オーストリアのプランゼーで働いている時でした。私の仕事は、この材料の産業規模における熱間圧延プロセスを開発することでした。

当初は、この種の材料が高温環境においてさえ限られた変形能しかもたないゆえに、大きな薄板への圧延が可能かどうかについては大いに懐疑的でした。

しかし我々は、基礎研究プロジェクトの枠組み内において、チタンアルミナイドを商業ベースの熱間圧延機で加工する際に必要な条件を決定しました。

我々は自分達の開発したほぼ等温による圧延プロセスを、「先進薄板圧延プロセス」と名付けました。このプロセスは、チタンアルミナイド製造技術における画期的な技術であるとして国際的に称賛されました。当時プランゼーで圧延された薄板は、いまだに世界で製造された中でも最も大きなものです。さらに金属箔も加工されましたが、これはまた一つの大きな技術的進歩を意味したのです。

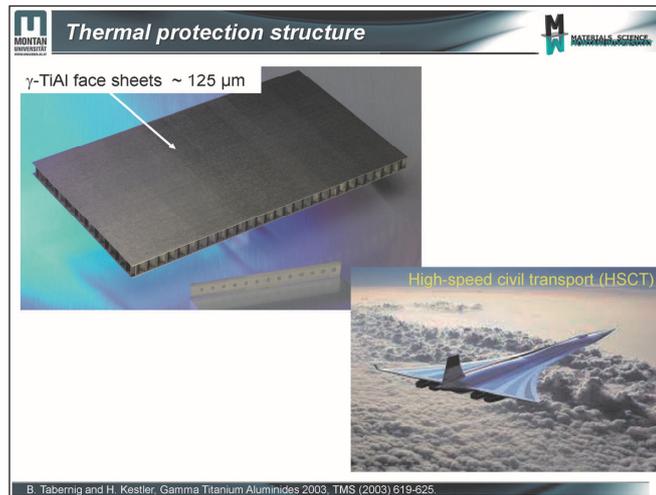


図-18

〈図-18〉 ここでは、チタンアルミナイドの薄板および箔の製造技術における最も重要な成果をご覧ください。米国の「次世代超音速旅客機」プロジェクトの枠組み内において、プランゼーは、いわゆる断熱構造を作り出すことに成功しました。適切な接合技術が開発されこの断熱構造を実現したことによって、プランゼーとプロジェクトパートナーである NASA およびプラット・アンド・ホイットニーは、栄えある「R & D 100 Award」を受賞しました。

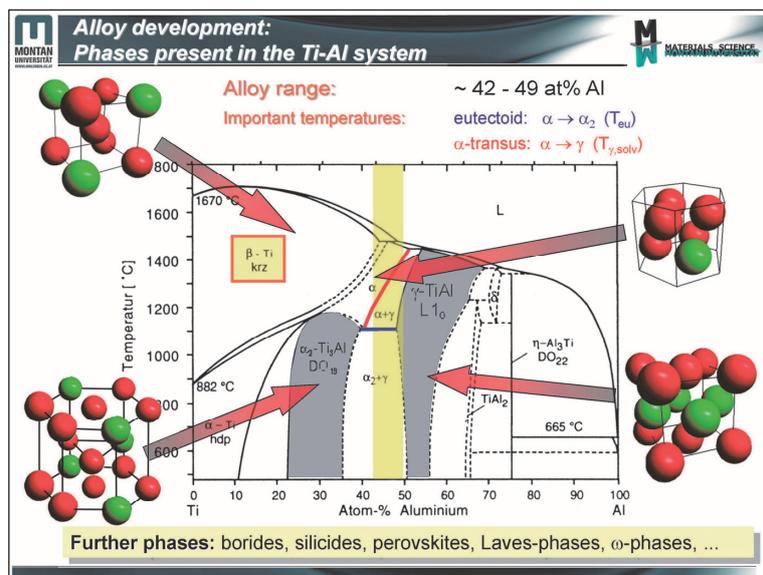


図-19

〈図-19〉 ここで、優れた熱間加工性とバランスのとれた機械的特性を兼ね備えたチタンアルミナイド合金の開発戦略について、簡単にご説明したいと思います。オープニング映像でご覧いただいたように、長い時間をかけて成功の可能性について議論した後、10年近く前開発プロジェクトに着手したのは、MTU アエロ・エンジンのウィルフリート・スマースリー博士でした。つねにプロジェクトの成功を信じていてくれ、上手くいかない時期にも決して支援を止めることはなかったウィルフリート・スマースリー博士には、ここで心から感謝を申し上げたいと思います。

竹山雅夫教授は、いつも学会やワークショップの場で「状態図が必要です」と主張されます。私もまったく同じ考えです。状態図は微細構造の変化を理解するための基礎となりますし、処理パラメーターを調整するための役にも立ちます。

このスライドでご覧いただくのは、二元チタン-アルミニウムの状態図です。状態図についてよくご存じない方のために、簡単にご説明します。金属合金中の相とは、特定の結晶格子と化学組成をとともなう、一つの特定の領域のことです。状態図とは、ある特定の合金機構における複数の相の外観と安定性を、温度と組成の関数として表すものです。

例えば、チタン-アルミニウム機構において、先進多相チタンアルミナイド合金の挙動を理解するためには、以下のような相が重要です。

最も重要な相は秩序化 γ -TiAl 相で、これについては先ほどご説明しました。次に重要な相は α_2 -Ti₃Al 相と呼ばれるもので、秩序化された六方格子を持っています。エンジニアリングチタンアルミナイド合金には、42~50 原子百分率のアルミニウムが含まれています。黄色で示している領域です。このために二元合金は、室温においても適用温度においても、ガンマ相および α_2 相から構成されます。

α_2 相は、高温時には秩序が乱れて α 相となり、単純な α 六方格子を形成します。しかし α -Ti(Al)相は、高温環境下においても変形させることは非常に困難です。

低アルミニウム濃度の領域において、もうひとつ重要な相があります。立方体心 β -Ti(Al)相と呼ばれるもので、 α 相とは対照的に、優れた変形挙動を示します。このために、加工の難しいチタン合金の熱間加工は、 β 相が高体積含有率を示す温度領域において行われるのです。

この概念がチタンアルミナイド合金にも有効であることを明らかにしたのは、竹山教授の功績です。

ここでのポイントは、 β 相の存在領域を状態図の右側へと移動させることです。このために、ニオブウムやモリブデン、あるいはバナジウム等の β 安定化合金元素を使用する必要があります。

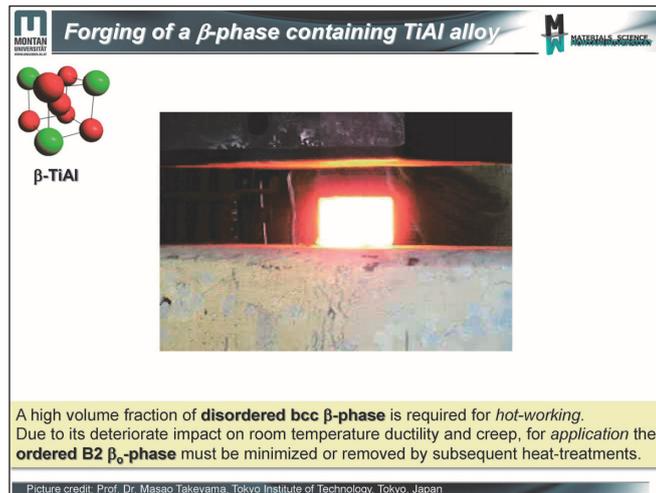


図-20

〈図-20〉 この竹山雅夫博士（教授）ご提供の素晴らしい映像では、 β 含有合金がいかに容易に変形可能かということがご覧になれます。ただし、この映像のように比較的質量の大きな物質だと、鍛造プロセスにおける熱損失は発生しません。タービンブレードのように、パーツが小さくなった途端、熱損失が重大な問題となります。とはいえ最先端の鍛造機械には、チタンアルミニド合金に適した鍛造パラメーターを選択するだけの十分な余地があります。

しかし鍛造の成功だけが目的ではありません。もう一つ重要なのは、部品が最終的にバランスのとれた機械的特性を獲得することです。鍛造挙動を改善してくれる β 相は、室温においては脆化、使用温度においてはクリープ特性の劣化等を引き起こし、部品の機械的特性を低下させることが知られています。

したがって鍛造加工後に熱処理によって β -TiAl 相を除外することが可能な合金設計方法を選択せねばなりません。

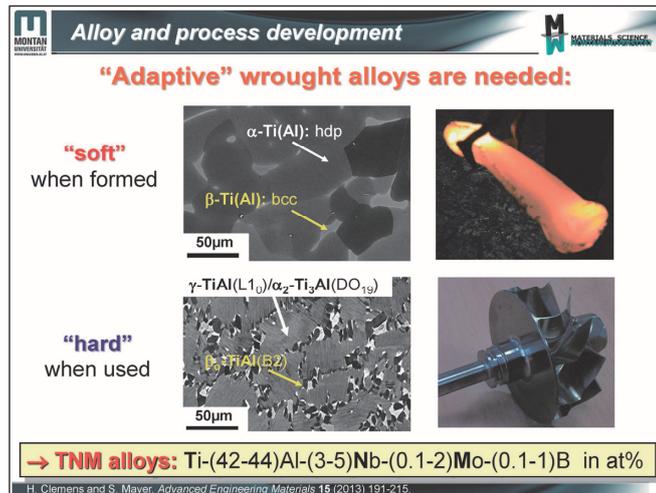


図-21

〈図-21〉 先の数枚のスライドで定義された必須要件の分析を鑑みれば、「適応性のある」鍛錬用合金が必要であることはあきらかです。

このことは、成形時には柔らかく、使用時には硬い材料であるべきだ、ということの意味します。

この目標を達成するために、新しいチタンアルミナイド合金の化学組成を把握するべく、初めて熱力学シミュレーションが行われました。コンピューターによる合金設計について事細かに述べても皆さんを退屈させるばかりですので、端的に最終結果をお見せしましょう。これが TNM 合金の化学組成です。

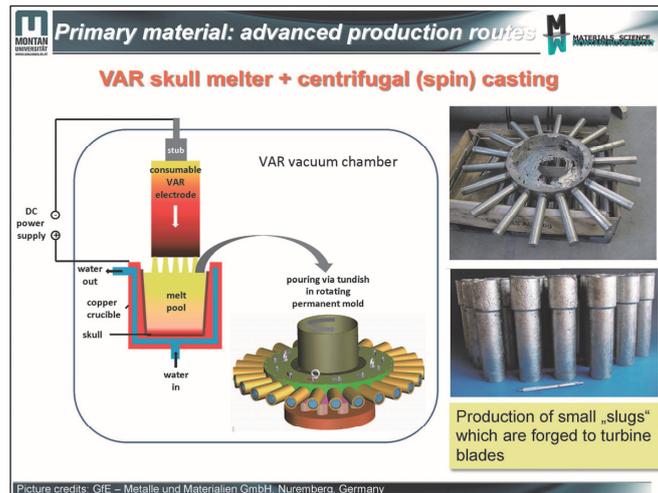


図-22

〈図-22〉 材料の組成を定義したら、次の論理的段階は、費用効率が高くしかも十分な材料品質を確保できるようなプロセスを用いて、その次の鍛造段階のための原材料を作り出すことです。

ここで、TNM 合金の凝固特性と相転移特性に適合する先進生産方法を開発してくれた、「GfE - Metals and Materials」（ニュルンベルク、ドイツ）のヴォルカー・グッター博士とその研究チームに感謝を捧げたいと思います。

この概略図は、そのプロセスがどのように機能するのかを示しています。まず始めに、チタン合金の製造に世界中で用いられている真空アーク再溶解という技術によって、大きな鋳塊が製造されます。鋳塊は真空室に入れられ、誘導加熱された銅るつぼの中で再溶解されます。溶解物が化学的に均質になるとすぐに回転中の永久鋳型へと注がれ、凝固されます。

右側の画像は、鋳型を外した後の鋳物です。下部では、この生産方法から「スラグ」と呼ばれる小さな鋳塊が生じ、熱間等静圧圧縮成形を経た後に、スラグをそのままタービンブレードに鍛造することが可能である、ということが分かります。

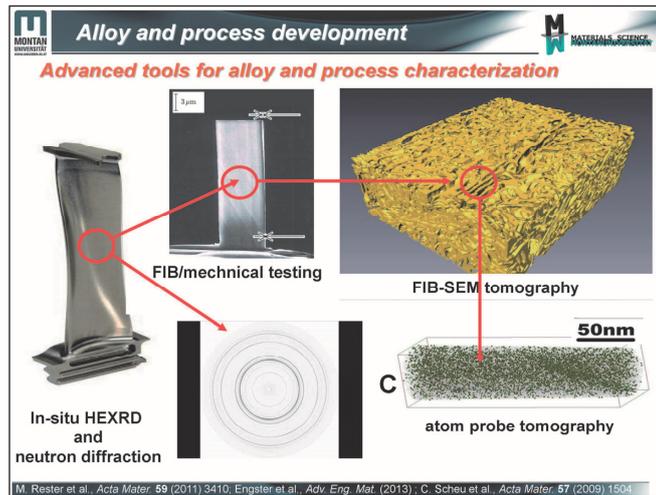


図-23

〈図-23〉 このスライドでは、我々が合金やプロセス特性化に適用した先進ツールについてまとめました。マイクロメータースケールにおける材料の機械的挙動を理解するために極小の試料を制作し、走査型電子顕微鏡によって試験をおこないました。

構成している相の複雑な配列を理解するために、トモグラフィー法による材料の微細構造の分析もおこないました。

原子レベルにおける化学組成の分析には、原子プローブトモグラフィーのような高解像度の技術を用いました。この画像（右下）では、より先進的なチタンアルミナイド合金内における炭素原子の分布がご覧になれます。一つの緑色の点が、一個の炭素原子に相当します。

科学的見地からいって、チタンアルミナイドの熱間変形挙動を理解するために高エネルギーX線回折のようなその場測定を用いたことは、革新的な一歩でした。この事については、これから別のスライドでご説明します。

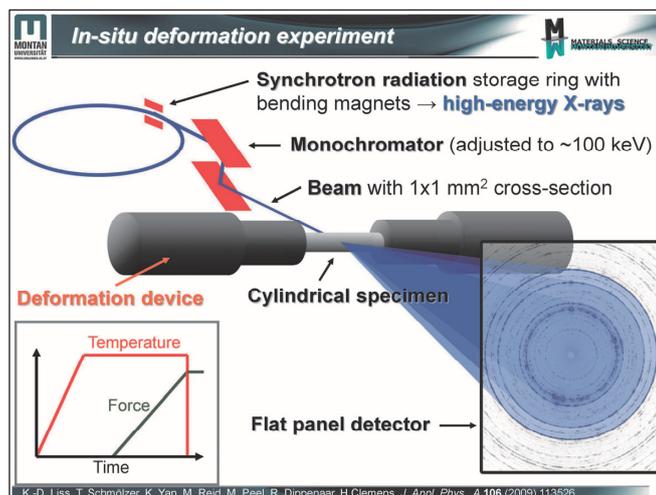


図-24

〈図-24〉 TNM 合金からタービブレードを鍛造するためには、原理的には「恒温鍛造」または「従来法に近い熱間型鍛造」という二つの鍛造プロセスが適しています。これらの異なる鍛造プロセスの詳細に立ち入ることはいたしません。極秘事項に相当しますので。

しかし材料科学者として私は、「その場」で、そして「ライブで」、超高温環境において変形中の材料には何が起きているのか、またどんな機構やプロセスが塑性変形や微細構造成長に貢献するのかについて知りたいと思います。そのために私は、クラウス-ディーター・リス博士と共同研究を開始しました。博士に初めてお会いしたとき、また我々がチタンアルミナイドに関する最初の実験の枠組みを決定した時、彼は GKSS 研究センターに勤めていました。後に彼はオーストラリア原子力科学技術機構 (ANSTO) に加わり、彼の研究チームとともに、シンクロトロン放射を用いた数種類の材料の熱機械加工に関する先駆的な研究を行なっています。

このスライドでは、「その場」変形実験の構成を示しています。まず初めに、通常は大きな研究機関に関連している、シンクロトロンにアクセスする必要があります。簡単にいうと、シンクロトロンとは無数の電子が同調しつつ円を描いて動いている、巨大な輪です。円運動のさなかに、電子は高エネルギーの X 線を放射します。輪を離れた X 線は約 100 キロ電子ボルトのエネルギーになり、断面積 1mm^2 の光線へと収斂します。

その他の重要な機器は、直径 4mm、長さ 8mm の円筒試験片を定められた温度および力によって変形することが可能な変形機器です。目的は、産業用鍛造プロセス全体を小さい規模でシミュレートすることです。

もちろん皆さん全員が X 線回折のエキスパートではいらっしゃらないでしょうから、簡単にご紹介します。X 線が微粒子多結晶材料にぶつくと、検出器によってデバイ・シェラー環と呼ばれるものが記録されます。いくつかの環には、より大きな粒の回折で生じた大きな点が見られません。異なる相とその原子面は異なる一連の環を生み出す、ということに留意する必要があります。しかし経験を積みれば、異なる環を異なる相に割り当てることは比較的容易になります。

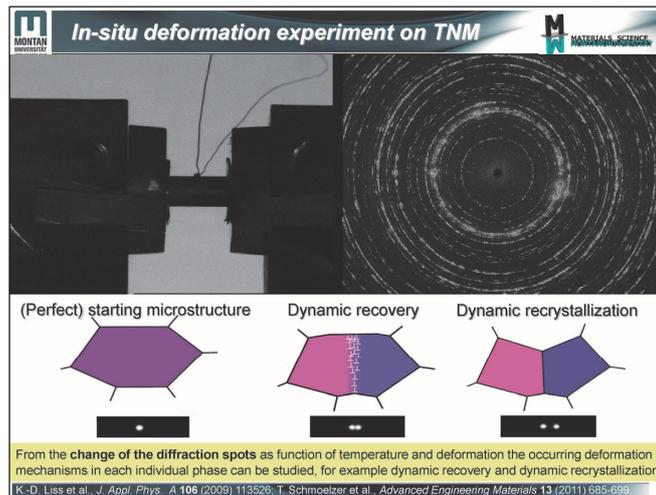


図-25

〈図-25〉 このスライドの左側の画像は変形機器で、右側の画像は対応するデバイ・シェラー環です。

TNM 試料は、変形機器の中心にあります。ワイヤーは、温度制御に用いられる熱電対につながっています。試料を熱すると、対応する相が組織の中に溶解して存在しなくなるため、いくつかの環は消え去ります。

スライド下部に示されているように、回折スポットを変更することにより、個々の相において発生している、変形機構（動的回復や動的再結晶化など）について研究することができます。

動的再結晶化の効果、すなわち新たな微粒子微細構造の形成の様子は、大きめの粒に属するこれらの回折スポットを観察することで確認することができます。変形が進行するとこれらの巨大なスポットは消滅し、非常に均質な環が形成されます。これは、熱間変形中に粒の精緻化が起こったということを意味しています。

再結晶化に加えて、デバイ・シェラー環を評価することで他の情報も得ることができます。そのうちの幾つかをここに示しました。

この話題について最後に申し上げたいのは、「その場」実験は合金およびプロセス開発における強力なツールであり、多くの科学的・技術的疑問の解決を可能にするのです。今日、産業界においても、材料とプロセスの最適化のためにこのような先進的解析法がより多く使われ始めているのは、喜ばしいことだと思います。

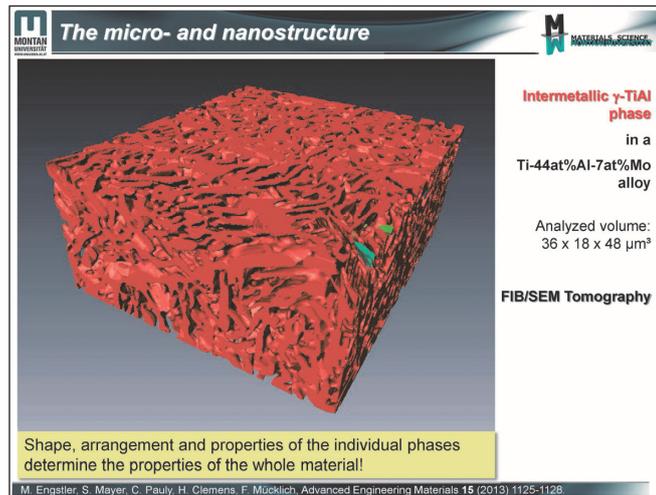


図-26

〈図-26〉 このスライドから、本日の講演の最後のエピソードに入ります。個々の相の形体や配列、また特性がどのように材料の機械的特性を決定づけているのかについて、簡単にご説明したいと思います。

これは、室温において二相で構成されるチタンアルミナイド合金内における γ -TiAl 相の三次元配列です。 γ 相の存在をよりはっきりと確認するために、このトモグラフィー画像では第二相を隠しているので、あたかもスイス産チーズ（「穴だらけ」という意味）のように見えています。

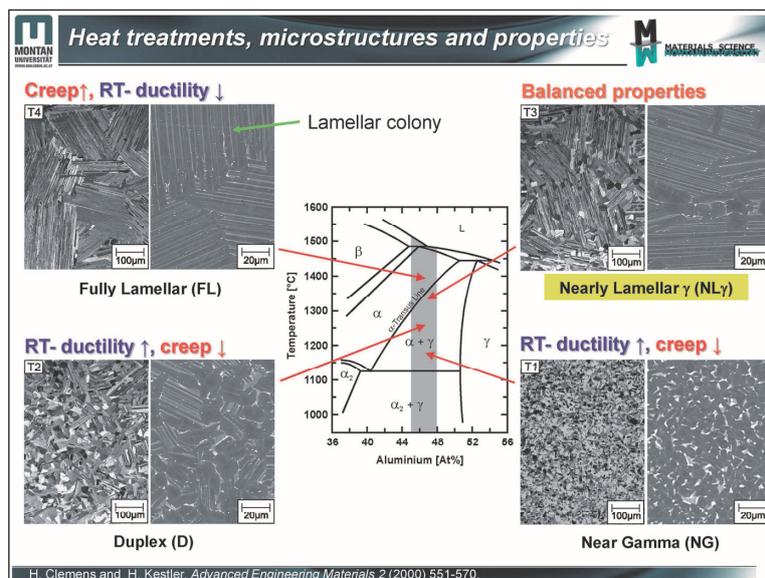


図-27

〈図-27〉 チタンアルミナイド金属間化合物加工に際しての微細構造と機械的特性との関係を理解していただくために、このスライドを作成しました。

スライド中央部にあるのは、二元チタンアルミナイド相の断面を表す図表です。工業用合金の組成範囲は、灰色の矩形で示されています。なお、TNM合金は三相合金であり、実際の状態図はもっと複雑なのですが、このように単純な状態図によっても、微細構造と機械的特性との基本的な関係は表現することができます。

状態図の左右には、異なる相フィールド領域において焼きなましすることにより得られた微細構造が示されています。左側の画像は光学顕微鏡、右側の画像は走査型電子顕微鏡によって撮られたものです。ここでは、 α_2 -Ti₃Al相が明るいのに対して、 γ -TiAl相は暗く見えています。

鍛造後材料は、均質な微粒子微細構造を示します。この微細構造を、「ニアガンマ」と呼びます。このタイプの微細構造は室温において優れた延性を示しますが、粒子が微小であるため、貧弱なクリープ特性を示します。

対照的に、鍛造材料が単 α 相フィールド領域内において超高温で焼きなましされると、粒子のサイズは急速に粗くなり始めます。室温にまで冷やされると γ 相が形成され、室温においていわゆる α_2/γ コロニーが存在します。このような「完全ラメラ」微細構造は優れたクリープ特性を示しますが、コロニーのサイズが大きいため、延性は非常に低くなります。ここでは、クリープ強度はラメラの間隔によって大きく左右される、という点が重要です。

TNM合金におけるバランスのとれた機械的特性、すなわち高温環境での優れたクリープ特性と室温環境での十分な延性は、鍛造合金を、($\alpha + \gamma$)相フィールド領域中の高い温度領域において焼きなましすることにより、獲得することができます。最終的な微細構造は、クリープ特性を決定づけるラメラコロニーと、コロニー境界において配列され、その体積分率が室温における延性を左右する、球状の γ 粒子から構成されます。

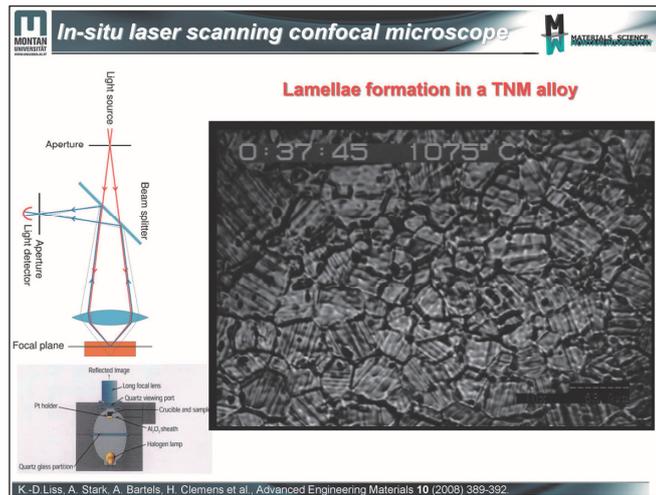


図-28

〈図-28〉 材料科学者は、微細構造の変化を直接観察することを好みます。これはレーザー走査共焦点顕微鏡法によって、TNM合金におけるラメラ微細構造の発生をとらえた映像です。この実験では、試料は α 相フィールド領域から冷却し、その表面をレーザー光線でスキャンします。スライドの左側には、実験の構成を図式化して示しました。ある特定の温度で γ -TiAl格子は核となり、そして α -Ti(Al)粒子内において成長して、ラメラ微細構造を形成します。こうした実験は微細構造の成長を理解する上でたいへん役立ちますし、このような発見は、加熱率・冷却率・焼鈍温度・保持時間などの熱処理パラメーターを最適化するために利用することができます。

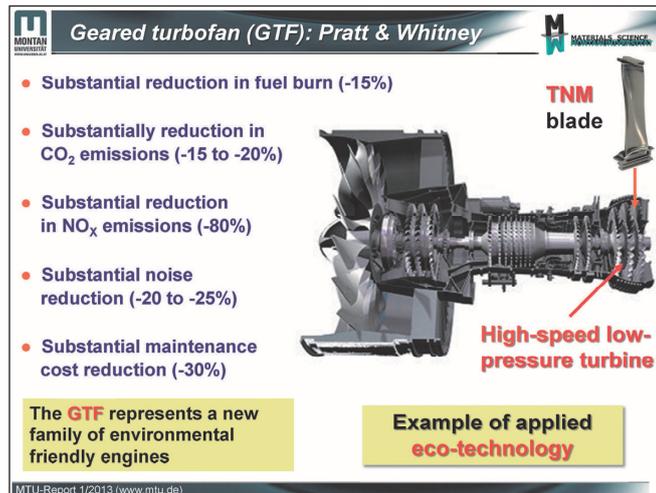


図-29

〈図-29〉 TNM 合金の開発、即ちタービンブレードの鍛造プロセス、およびバランスのとれた機械的特性を得るための熱処理法が完成したら、合金は実際のアプリケーションに供することができます。

TNM 合金は、プラット・アンド・ホイットニー製造のいわゆるギヤードターボファンエンジンのために MTU アエロ・エンジンズが設計・開発した、高速低圧タービン用タービンブレードの材料に使用される予定です。

性能データをご覧いただければ、この次世代航空機エンジンが環境配慮型の新しいエンジンシリーズを象徴するものであり、エコテクノロジー応用の優れた実例であるということは明らかです。そして TNM 合金は、この先進航空機エンジンのコンセプトを実現するために、多大なる貢献を果たしているのです。



図-30

〈図-30〉 この画像は映像の一部を切り取ったもので、TNM 製ブレードが実験用の高速低圧タービンに使われているのがご覧いただけます。



図-31

〈図-31〉 材料科学者の研究人生におけるハイライトは、自分が開発したものの実用性が証明されたときです。この映像からのカットは、オープニングビデオですすでにご覧になられたかと思えます。

これは 2014 年 9 月 25 日、新型エアバス A320neo の、フランス・トゥールーズにおける処女飛行の様子です。この機体は、鍛造 TNM タービンブレード使用の GTF エンジン二基を搭載しています。

約二時間半の処女飛行の後に航空機は着陸し、無事に駐機場へ帰還しました。



図－32

〈図－32〉 こうした全ての科学的・技術的成果は、過去 20 年間に渡って世界中の数多くの仲間と共に研究し、交流し合うという恩恵なしには成し遂げられなかったでしょう。このリストだけでは不十分ですが、赤字で示したのは、科学者人生を通じて私を導いてくださった方々であり、そのうち何名かは TNM プロジェクトにたいして手厚い、継続的な貢献をしてくださいました。

さらには、いつもサポートをし続けてくださり、研究を成功させやすい雰囲気を作ってくれている所属部署や私の研究チーム、大学に対して、感謝申し上げます。この授与式にレオーベン鉱山業大学学長のウィルフリート・アイヒルセダー教授にご出席いただけたことは、望外の喜びです。

最後になりますが私の家族、妻のルート、息子のローランド、彼のガールフレンドのタマラに対して、深い感謝を捧げます。彼らが愛情と理解をもって支えてくれているということは、いつも私にとって真の原動力になっています。



図-33

〈図-33〉 これが本講演の、最後のスライドとなります。私が 2014 年の本田賞を受賞するというニュースを聞いてすぐ、この小さなアート作品が目に入りました。

このパズルを完成させようとしている人物は、環境に優しい次世代航空機エンジンに使われる新素材を開発した私かもしれません。

この人物は、私たち一人ひとりであるとも言えます。「人間性あふれる文明の創造」のために誰もがそれぞれの役割を果たす必要があり、そして本田宗一郎氏のビジョンを実現させることができるのです！

これにて、講演を終了させていただきます。御列席いただいた皆様、御清聴まことに有難うございました。

- このレポートは本田財団のホームページに掲載されております。
講演録を私的以外に使用される場合は、事前に当財団の許可を得てください。



公益財団法人 **本田財団**

HONDA FOUNDATION

発行責任者 松 澤 聡
Editor in chief Satoshi Matsuzawa

104-0028 東京都中央区八重洲 2-6-20 ホンダ八重洲ビル

Tel. 03-3274-5125 Fax. 03-3274-5103

6-20, Yaesu 2-chome, Chuo-ku, Tokyo 104-0028 Japan

Tel. +81 3 3274-5125 Fax. +81 3 3274-5103

<http://www.hondafoundation.jp>