

輸送機器に使用される材料びよお 材料加工法の最新動向

H18 材料物理学専攻 修了
森橋 遼

本日の話題

1. 自己紹介
2. 背景
3. 軽量材
 - 3-1. 複合材: 繊維強化プラスチック(FRP)など
 - 3-2. アルミリチウム(Al-Li)合金
 - 3-3. マグネシウム(Mg)
4. 軽量化のための材料加工方法
5. おわりに

自己紹介

- **氏名・卒業年:森橋 遼(もりはし りょう)**
2006年 材料物理学専攻修了
- **現職:川崎重工業株式会社 技術開発本部**
- **出身:神奈川県相模原市出身**
- **経歴:2006年に川崎重工業に入社以来、モーターサイクル、油圧機器などの産業機械、鉄道車両、民間航空機などの研究開発に従事**
- **学位、資格等:修士(工学)**
- **趣味:テニス、ゴルフ、ランニング、読書(特に歴史)**

本日の話題

1. 自己紹介

2. 背景

3. 軽量材

3-1. 複合材: 繊維強化プラスチック(FRP)など

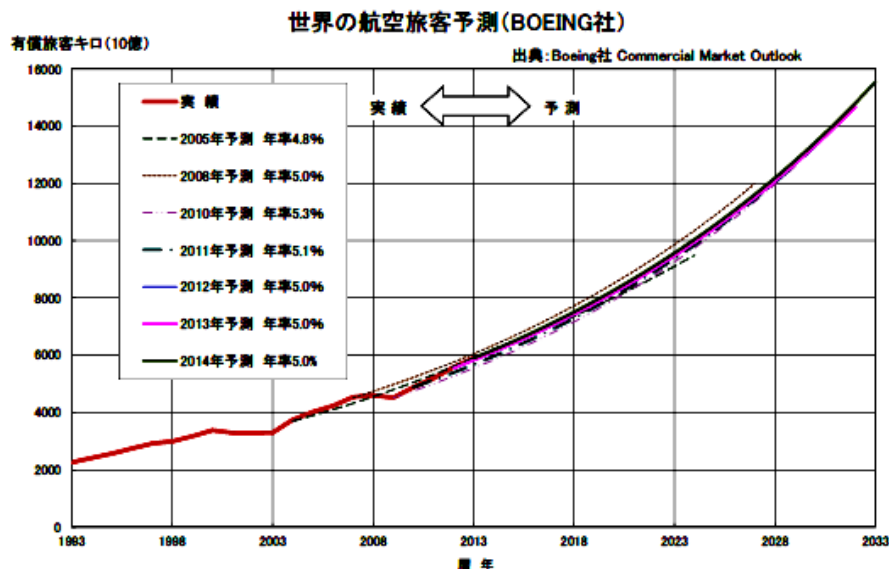
3-2. アルミリチウム(Al-Li)合金

3-3. マグネシウム(Mg)

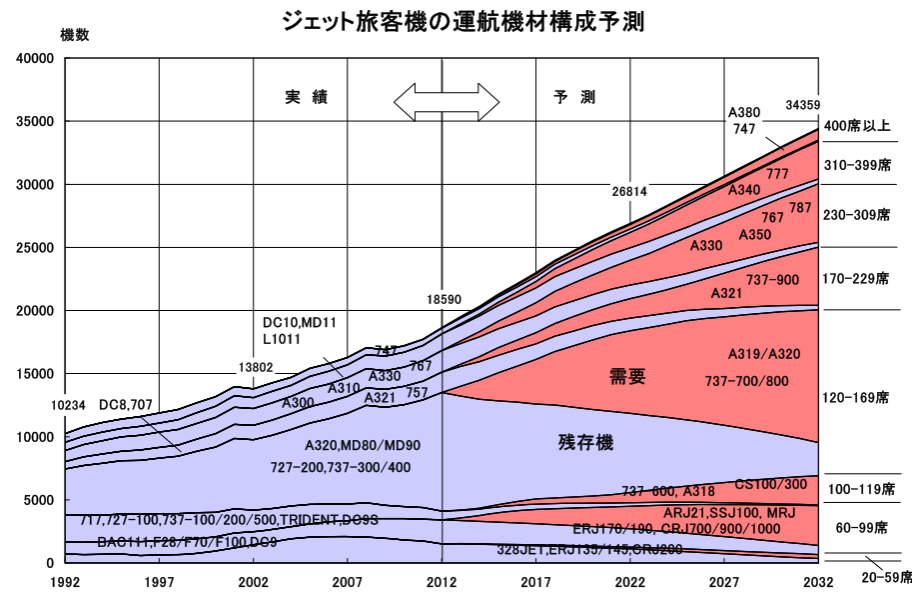
4. 軽量化のための材料加工方法

5. おわりに

背景(民間航空機の場合)



出典:平成26年度版 民間航空機関連データ集【(財)日本航空機開発協会】

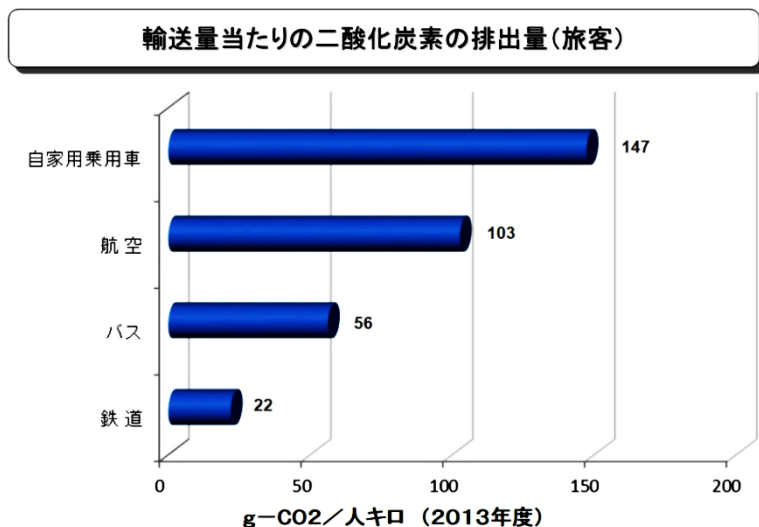


出典:民間航空機に関する市場予測 2013-2032【(財)日本航空機開発協会】

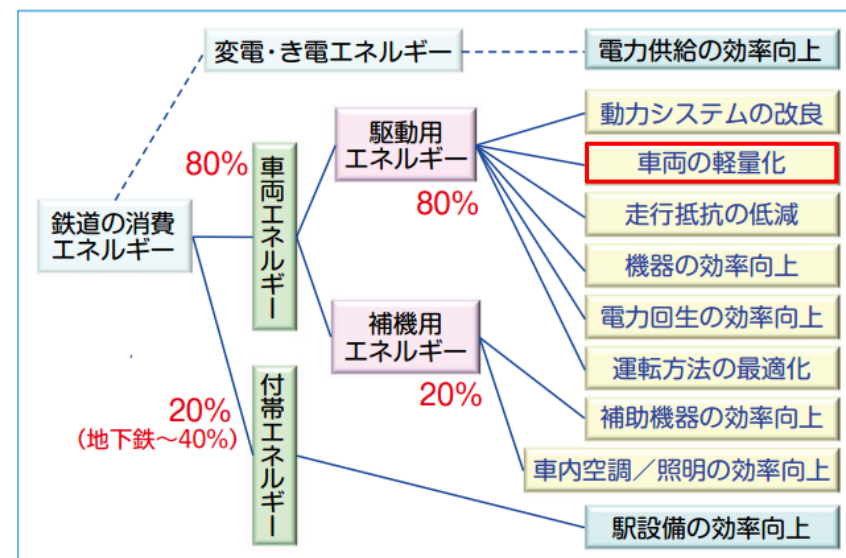
- 世界の航空旅客は、年率約5%で増加見込み(アジア太平洋地域にて顕著)
- 市場規模(機体需要)も2030年頃まで増加見込み ⇒各社による争奪戦
- 機体需要が最も多いのは150席クラス(B737、A320)
- 燃料費高騰により、エアラインの燃料コスト削減ニーズが強い

燃費改善のための機体、エンジン等の軽量化が重要

背景(鉄道車両の場合)



出典:国土交通省ホームページ



出典:Railway Research Review Vol.72 No.8 2015.8

- 鉄道の単位輸送量あたりのCO2排出量は他輸送機関に比べて低い
- 東日本大震災以降、国内でエネルギー不足と大幅な価格上昇が続いている
- 国交省、環境省にて「エコレールラインプロジェクト」事業をH24より実行
 ※2030年に鉄道からのCO2排出の2割程度の削減を目指し、省電力化や低炭素化に計画的に取り組む鉄・軌道事業者を支援
- 一方で、衝突安全性や遮音性向上も重要であり、これらを保った上での車体軽量化が欠かせない

本日の話題

1. 自己紹介
2. 背景
3. 軽量材
 - 3-1. 複合材: 繊維強化プラスチック(FRP)など**
 - 3-2. アルミリチウム(Al-Li)合金
 - 3-3. マグネシウム(Mg)
4. 軽量化のための材料加工方法
5. おわりに

繊維強化プラスチック(FRP)とは…

- FRP:Fiber Reinforced Plastics
- 繊維をプラスチックの中に入れて強度を向上させた**複合材料**

強化材と母材 (マトリックス) で構成される材料

複合材料	=	強化材	+	母材
土壁	=	藁、竹	+	粘土
鉄筋コンクリート	=	鉄筋	+	コンクリート
FRP	=	繊維	+	樹脂
GFRP	=	ガラス繊維	+	樹脂
CFRP	=	炭素繊維	+	樹脂

複数の材料を併用することで材料単独の弱点を補完する

繊維強化プラスチック(FRP)とは…

FRP

=

繊維

+

樹脂

- 炭素繊維
- ガラス繊維
- アラミド繊維 等

- 熱硬化性樹脂⇒●エポキシ樹脂
- 不飽和ポリエステル 等
- 熱可塑性樹脂⇒●ナイロン
- PTFE※1(テフロン)
- PEEK※2 等



炭素繊維
(東レホームページ)



ガラス繊維
(日東紡ホームページ)



GFRP積層板
(利昌工業ホームページ)

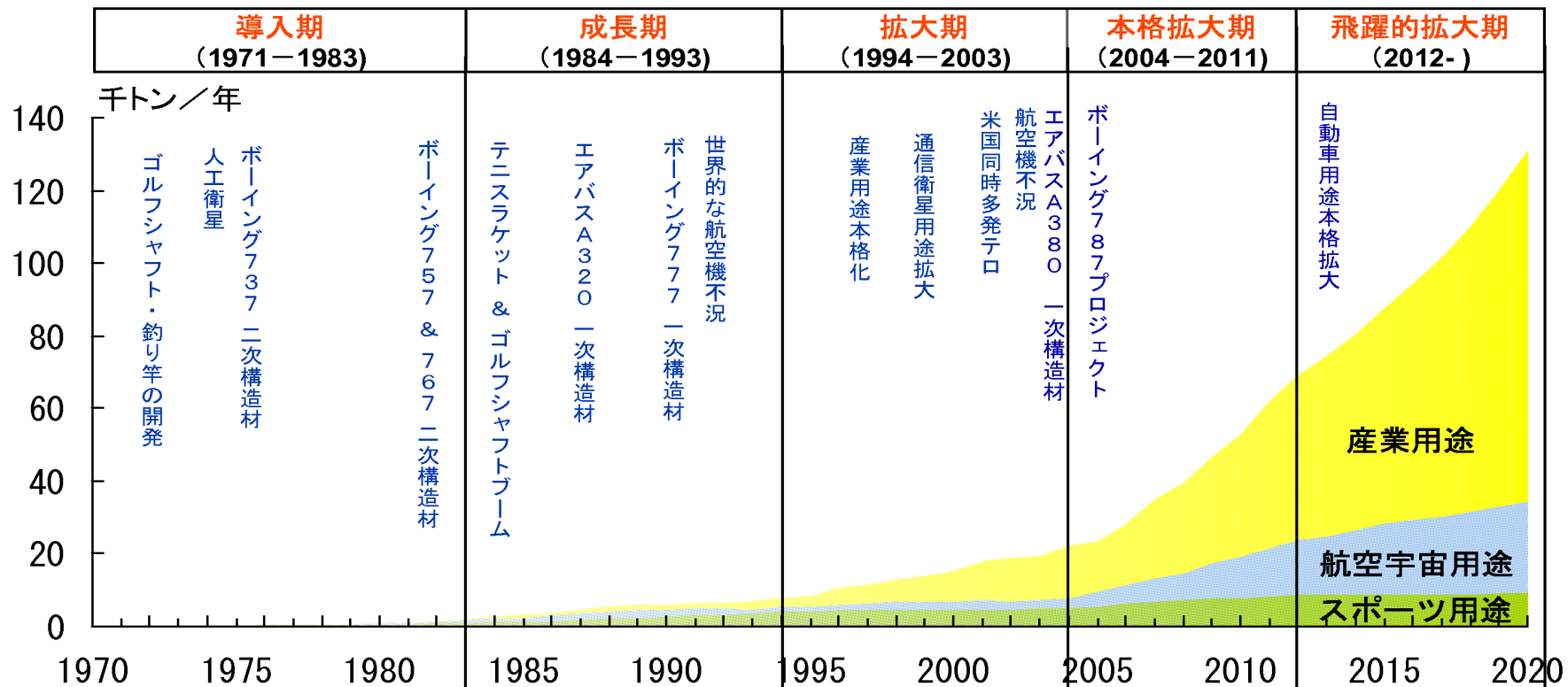


CFRP成形品
(ACMホームページ)

※1 PTFE: Poly Tetra Fluoro Ethylene

※2 PEEK: Poly Ether Ether Kethon

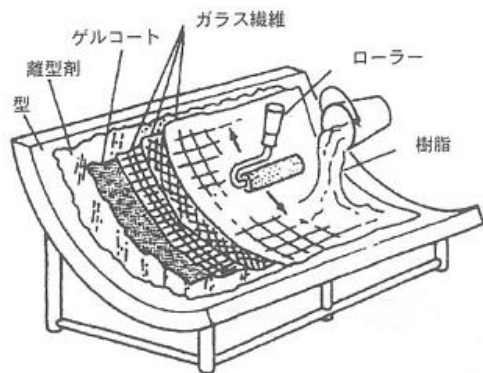
複合材料 需要の変遷



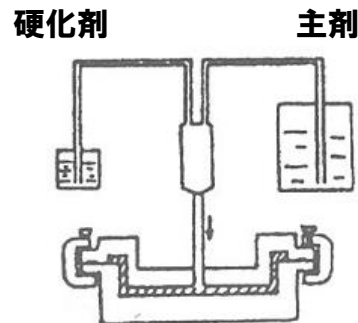
用途	限定分野	用途拡大	産業用途本格化	航空用途急拡大・自動車本格化
	釣竿 航空機二次構造材	テニスラケット ゴルフシャフト 航空機一次構造材	圧力容器 産業機械、船舶 土木建築、補修補強	航空大型プログラム 風力発電 自動車関連、海底油田
備考	高品質	品種増大 成形加工技術の進歩	コストダウン 大型構造材	加工法多様化 リサイクル対応

製造方法(代表的なもの)

出典: (社)強化プラスチック協会、だれでも使えるFRP
 三菱重工技報Vol.45 No.4 2008
 川崎重工技報 No.176 2015.10



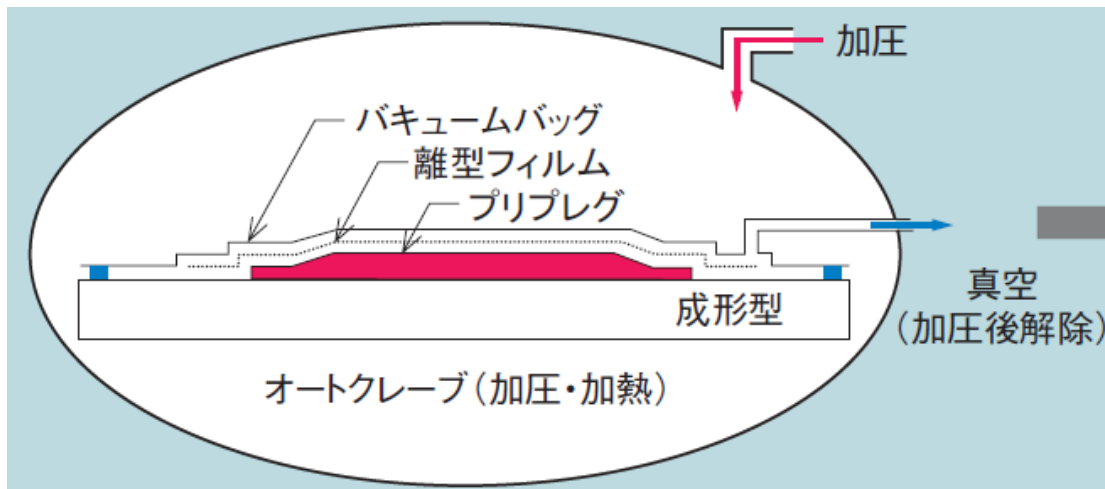
ハンドレイアップ
 (適用例:バスタブ)



プリフォーム

注入成形

RTM:Resin Transfer Molding
 (適用例:電気自動車の構造部材)



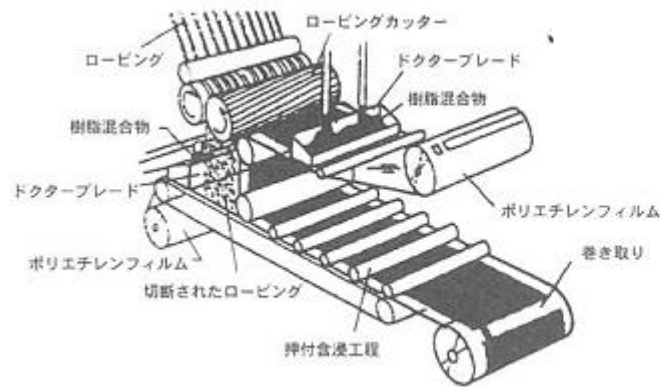
オートクレーブ(適用例:B787)



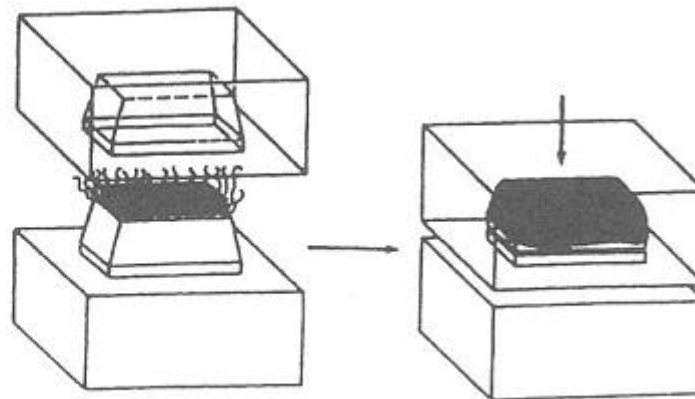
製造方法(代表的なもの)

出典: (社)強化プラスチック協会、だれでも使えるFRP

樹脂、硬化剤、充填材などを混合した樹脂ペーストをチョップドストランドに含浸させ、両面をフィルムで被覆したシート状の物を所定の温度条件で加熱し増粘させ、取扱い性を良好にしたSMCシートを作り、そのSMCシートを、裁断、計量して、金型にチャージして、さらに加圧加熱し硬化させ成形品を得る成形法

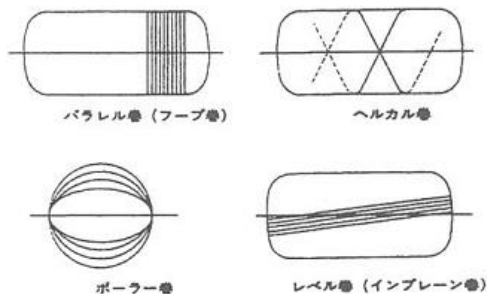


SMC製造工程



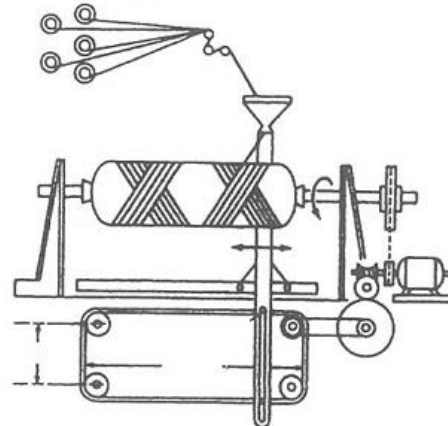
プレス成形工程

SMC: Sheet Molding Compound(適用例:浴槽)



ワインディングパターン

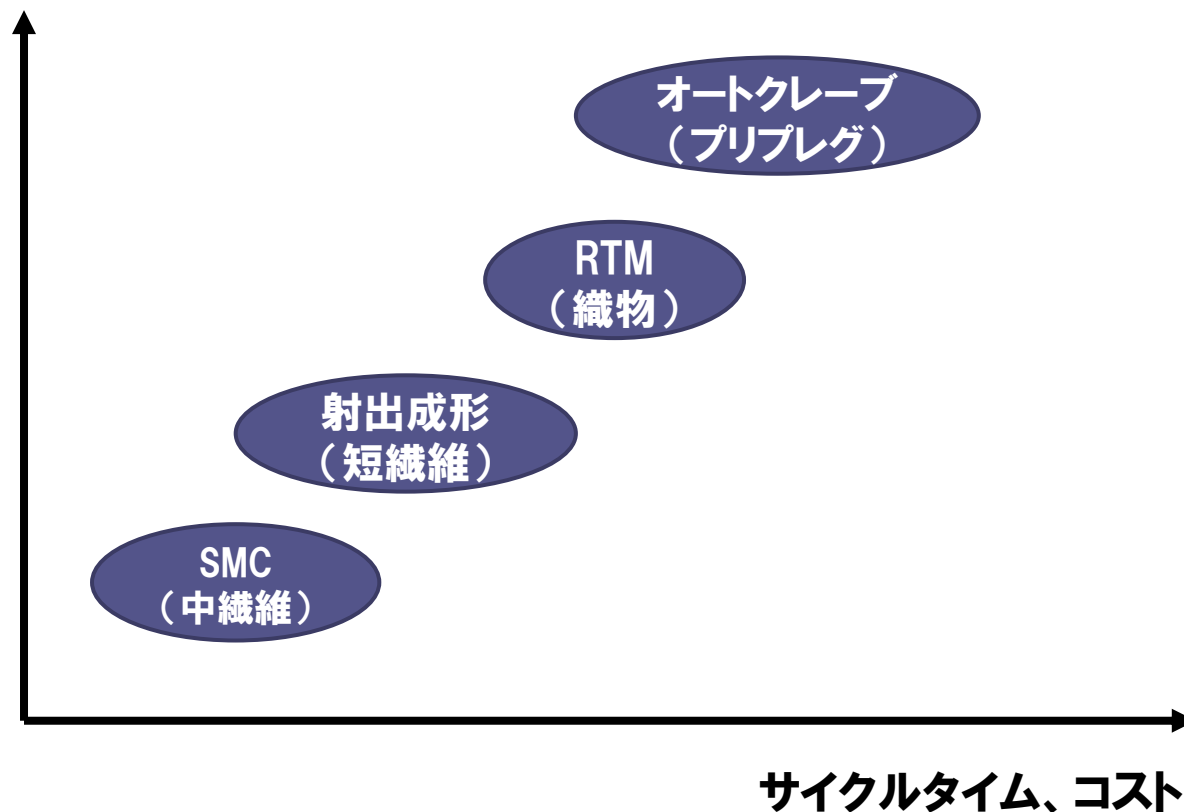
フィラメントワインディング(適用例:圧力容器)



フィラメントワインディングの概念

製造方法の特徴(力学特性とコスト)

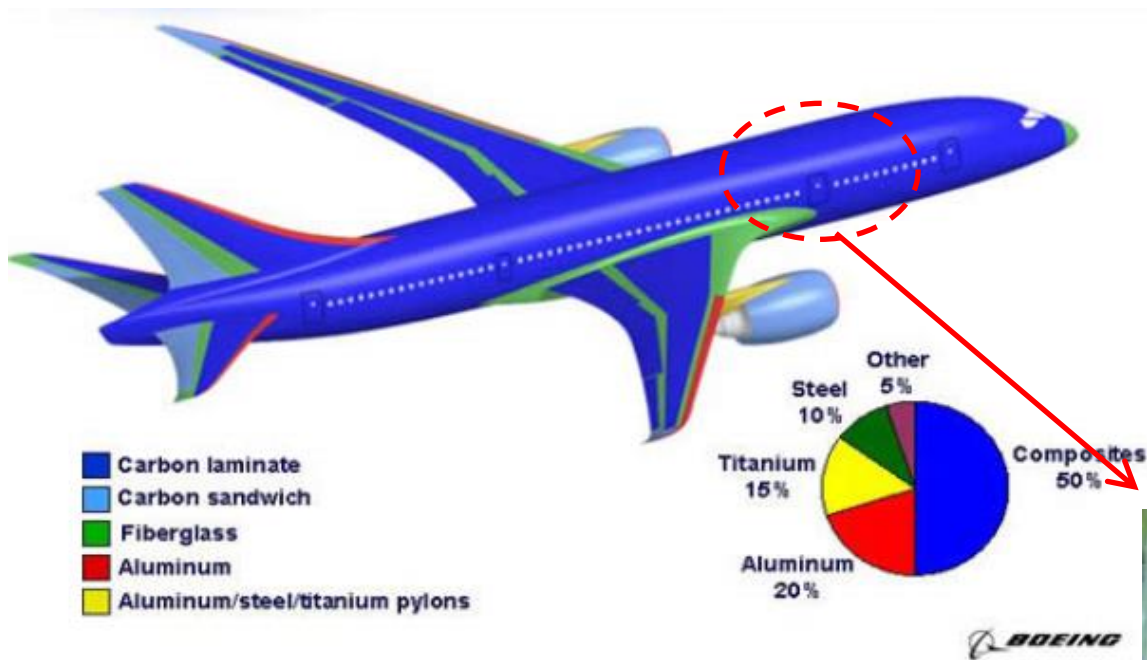
力学特性(強度・剛性 など)



複合材料適用のメリット

- 軽くて強い
- 必要なところを重点的に強くできる
(剛性、強度の自由設計)
- 曲面などの複雑形状部品の一体成形が可能
- 腐食しにくい
- 高い断熱性のものから熱伝導性の良いものまで
広い熱的性質を利用できる

航空機での複合材料適用例



出典: Boeing資料

Boeing 787

目的

- 軽量化
- 部品一体化



構造重量: 10,000lb減(4.5t)

燃費: 3%減(重量減によるもの)

(全体で20%燃費削減のうち、8%がエンジン、
3%が主翼等の空力改善)

ワンピースバレル

航空機での複合材料適用例



・ウィンドシールド(風防:コクピット前面の窓)、窓、大荷重を受ける金具以外はCFRP

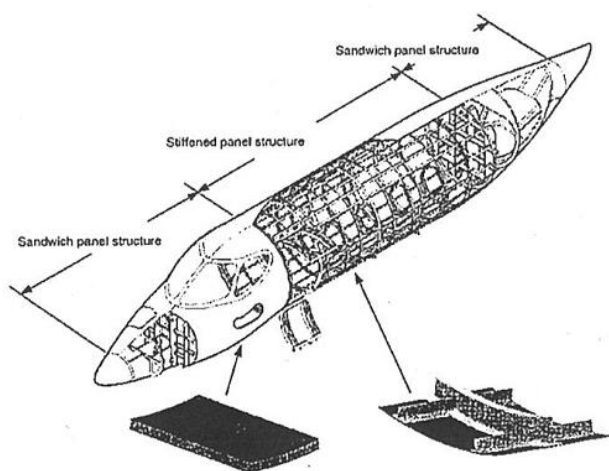


Fig. 1 Structural concept of all-composite fuselage

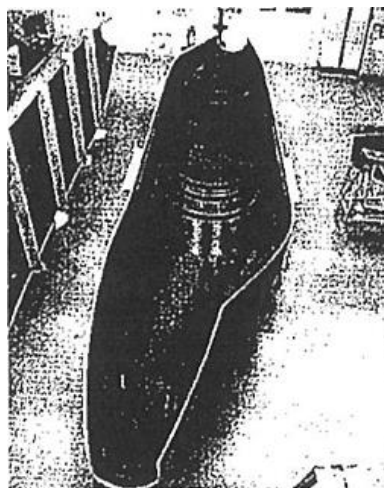


Fig. 2 Co-cured skin panel

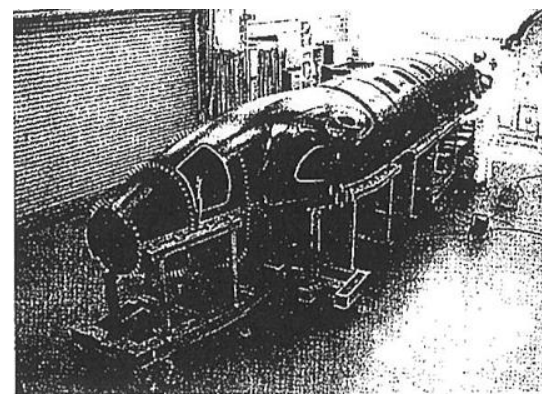
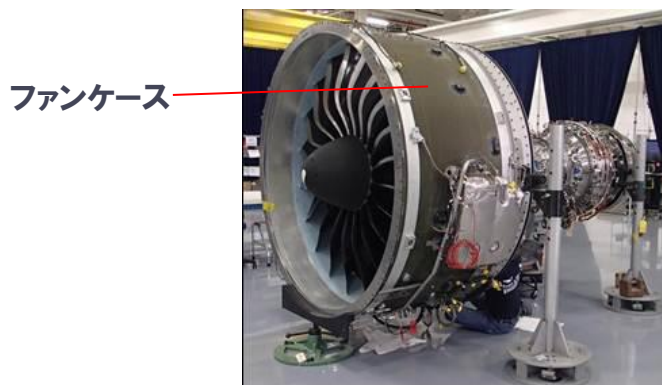
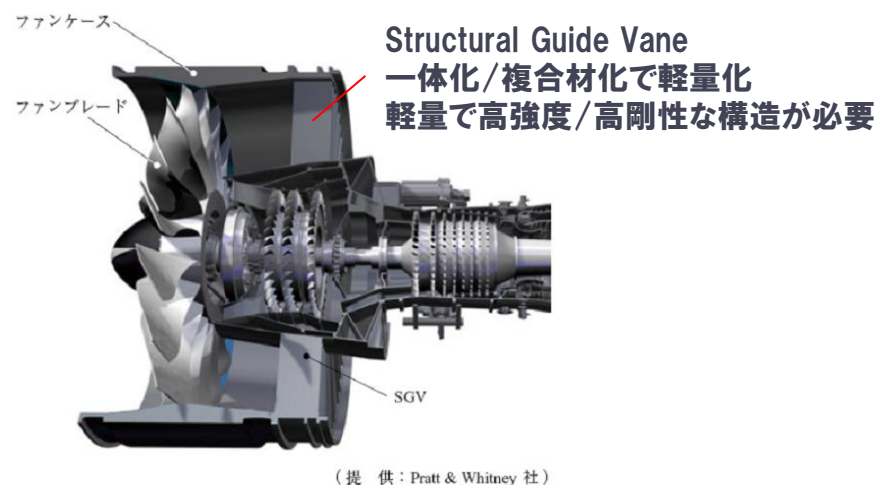
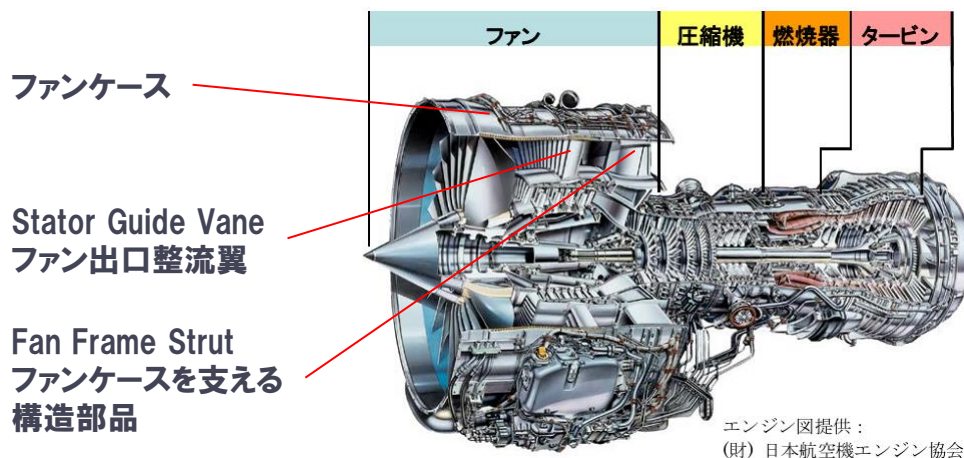


Fig. 3 Fuselage assembly

航空機用エンジンでの複合材料適用例

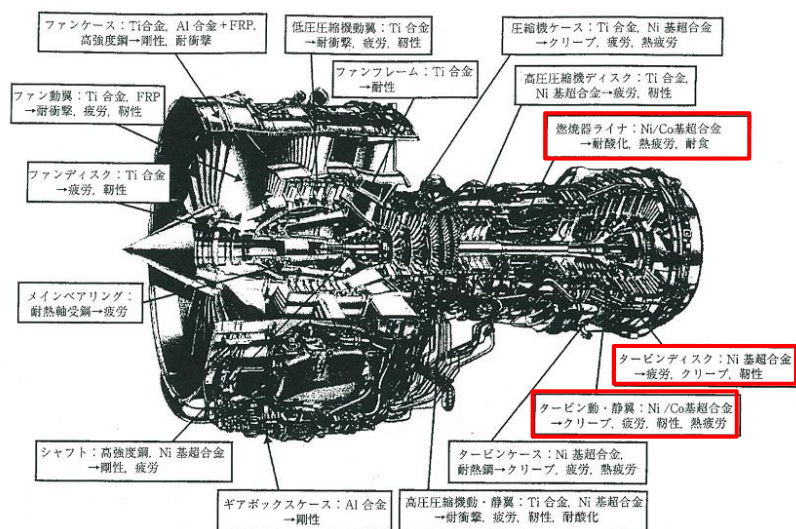
- 燃費低減のためには高バイパス比化が必要で、整流翼の大型が必要
- 従来はTi材だが、重量増



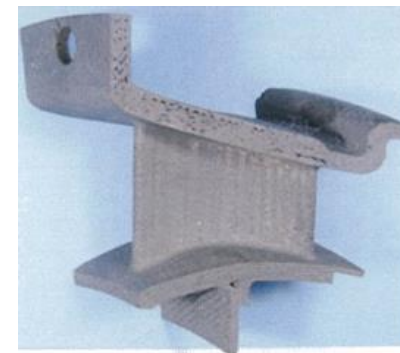
航空機用エンジンでの複合材料適用例

- 燃費低減のためには高バイパス比化だけでなく、高温化や軽量化も重要
⇒ 燃焼器、タービンなどの高温部材の軽量化、耐熱性向上
- Ni、Co合金などのレアメタルの削減

CMC※の適用検討
※Ceramic Matrix Composite



CMC動翼



CMC静翼

出典: 日鉄住金総研資料

【CMCの特徴】

- (○) セラミックス単体よりも靱性の大幅な改善が得られる
- (○) 従来より、SiC/SiC のタービン動静翼への適用開発が進められている
- (○) Ni合金に比べて比重が小さく、SiC/SiC では1/4程度
- (○) Ni合金よりも耐熱性に優れ、1200℃での比強度はSiC/SiC の場合で約3倍
- (×) 高コスト

鉄道車両分野での複合材料適用例



E4系新幹線 先頭構体

目的

- 軽量化
- 複雑曲面の一体成形

問題点

- 成形後の変形によって寸法ずれが生じ、下部の金属製構体フレームと合わなくなる



出典:新版 複合材料・技術総覧

鉄道車両分野での複合材料適用例

二次試験車



三次試験車



フリーゲージトレイン 新試験車両の先頭構体

- 軽量化が目的
※車輪間隔を変える特殊な装置を台車に取りつけているため、重量が大きく、レールへの負担がかかる

出典：<http://toyokeizai.net/articles/-/36540?page=2>

車体構造、内装、台車など各部の軽量化により、従来の試験車両に比べて1両あたり約2tの軽量化

出典：<http://response.jp/article/2014/04/21/221703.html>

鉄道車両分野での複合材料適用例

新型次世代台車 efWING

environmentally friendly Weight-Saving Innovative New Generation Truck

- 鉄道車両には厳しい重量制限、台車にも軽量が要求される
- 近年はセンサーなど保安部品も多く装着され、台車の重量は増加傾向
- 板厚や軽量穴などの構造変更による手法では限界



40%の軽量化

1両あたり約900kgの軽量化



出展：鉄道車両工業 470号 2014.4
川崎重工ホームページ
川崎重工プレスリリース 2014.4.21

量産車への複合材料適用例

1. 圧縮天然ガス(CNG)自動車向け

- ・従来のCr-Mo鋼容器では定員、積載量の減少、動力低能の低下が問題
- ・アルミ合金や樹脂のライナを炭素繊維(CFRP)で補強した複合容器の使用による軽量化※ ※ Cr-Mo鋼の1/3程度
- ・軽量化により圧力容器を屋根に設置でき、定員減少を回避



<http://www.jfecon.jp/product/hpc/cngv.html>



ライナ:アルミ合金、樹脂

CFRP(製造法:フィラメントワインディング法)

シェールガス革命によりCNGを燃料とする公営バスなどの大型車両の市場が急成長

<http://www.jfecon.jp/product/hpc/cngv.html>

2. 燃料電池自動車向け

- ・複合容器はライナがアルミ合金や樹脂のため、材質的に水素脆化しにくい



高圧水素タンク

<http://response.jp/article/img/2014/11/20/237788/790804.html>

複合材料適用のデメリット

- 材料費が高い ⇒ **サイクルタイムの短縮化**
Al合金: 数百円~/kg, CFRP: 数千円~/kg
- 耐衝撃性が悪い
⇒ 熱可塑性粒子・ゴム粒子の添加 など
- 高温・多湿環境に弱い(樹脂が吸湿して強度低下)
- 金属とは異なる成形プロセス・設備が必要
⇒ オートクレーブのような **大規模設備不要の製造方法**

サイクルタイム短縮化の事例

ねらい: 電気自動車の車体軽量化、駆動システムの軽量化・低コスト化
 (車体が重いと大きなモータや電池を必要とし、車体重量増、価格上昇という悪循環に陥る)

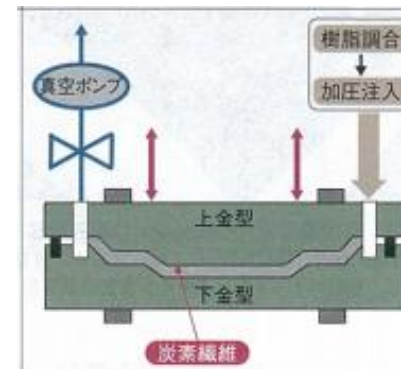
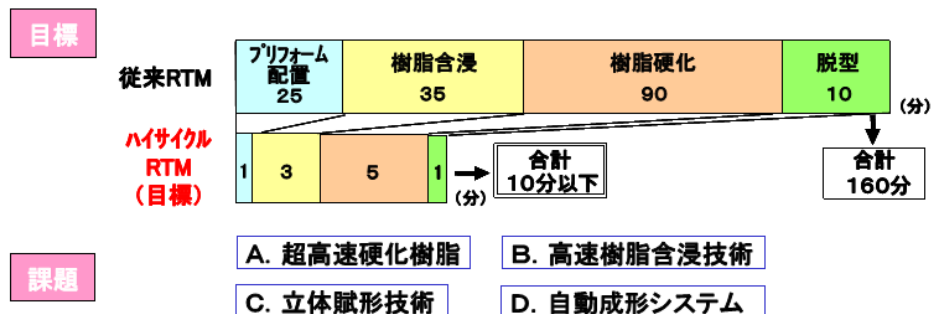


図6 RTMの成形工程
 (a)ロールから炭素繊維を引き出す、(b)プリフォームを成形する型の上に繊維をセット、(c)接着剤を塗布して型を閉じプリフォームを固めてトリミングする、(d)プリフォームをロボットでRTM成形機に投入。



RTM (Resin Transfer Molding)

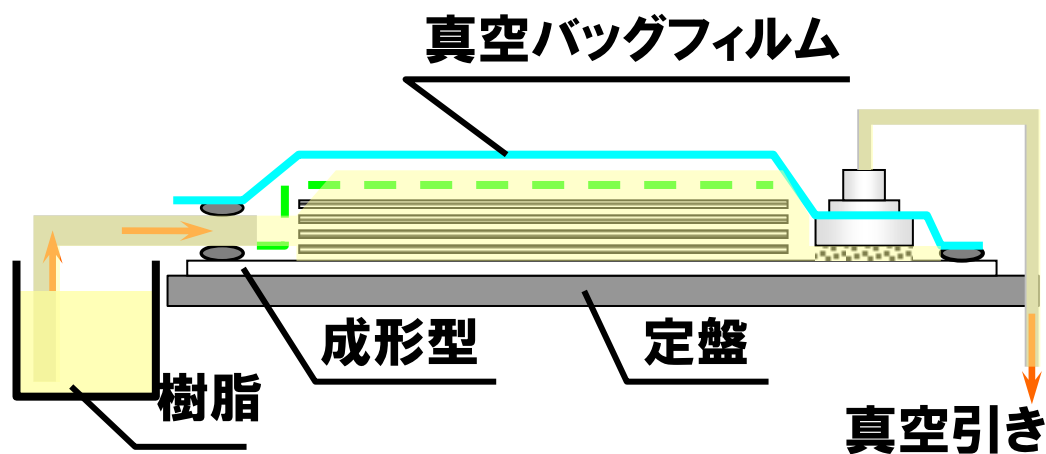


簡易設備で成形できる方法(VaRTM)

出典：三菱重工技報Vol.45 No.4 2008



VaRTM: Vacuum assisted Resin Transfer Molding



本日の話題

1. 自己紹介

2. 背景

3. 軽量材

3-1. 複合材: 繊維強化プラスチック(FRP)など

3-2. アルミリチウム(Al-Li)合金

3-3. マグネシウム(Mg)

4. 軽量化のための材料加工方法

5. おわりに

航空宇宙分野での事例(AI-Li合金)

【AI-Li合金の特徴】

- (○)最も軽い金属元素のLi(比重0.53)をAl(比重2.70)に1~2wt%添加した合金であり、従来のAl合金よりも最大で10%弱の軽量となる
- (○)2000系(Al-Cu-Mg系)をベースとしているため、高強度
- (×)焼入れ後に冷間加工してから人工時効(T8)する必要があり、均一な冷間加工が必要
- (×)低靱性(改良用にLiを1wt%程度に抑えた合金が開発されているが軽量化効果が犠牲)

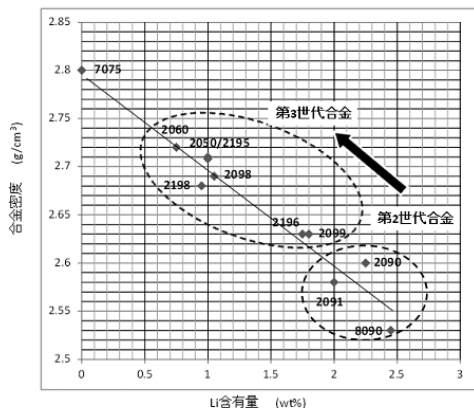


図6 リチウム含有量と合金密度の関係⁶⁾

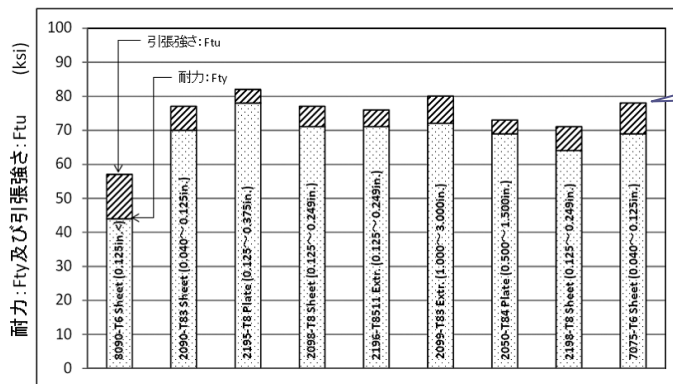
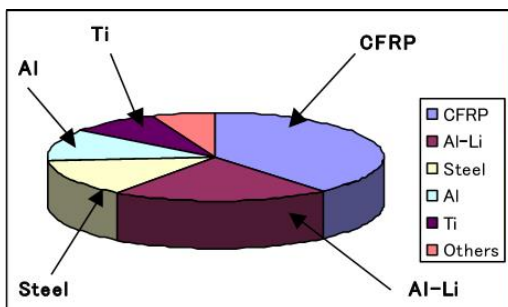


図7 アルミニウム・リチウム合金の引張強さ⁷⁾

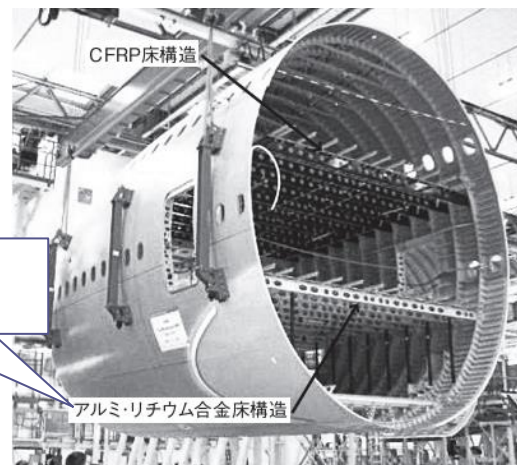
出典: JFA 2014 JANUARY No.45



エアバスA350の材料比率



出典:(公財)航空機国際共同開発促進基金

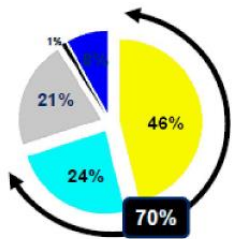


2196-T8、
2099-T8押し材

A380へのAI-Li合金の適用事例

航空宇宙分野でのAl-Li合金の適用例

C-Series: 70% Advanced Structural Materials Bring Significant Weight Savings



C SERIES
FOR THE FUTURE

BOMBARDIER



- 従来の2000系、7000系アルミよりも比強度が高く、耐食性にも優れる
(メンテナンス性向上)
- CFRPよりも修理が容易

(掲載url)

<http://tokyosexpress.info/2015/11/18/%E6%B0%91%E9%96%93%E8%88%AA%E7%A9%BA%E8%BC%B8%E9%80%81%E3%81%AB%E3%81%8A%E3%81%91%E3%82%8B%E6%8A%80%E8%A1%93%E9%80%B2%E6%AD%A9%E3%81%AE%E8%B6%B3%E8%B7%A1%EF%BC%88%E3%81%9D%E3%81%AE%EF%BC%93%EF%BC%89/>

本日の話題

1. 自己紹介
2. 背景
3. 軽量材
 - 3-1. 複合材: 繊維強化プラスチック(FRP)など
 - 3-2. アルミリチウム(Al-Li)合金
 - 3-3. マグネシウム(Mg)**
4. 軽量化のための材料加工方法
5. おわりに

鉄道車両分野でのMg合金の適用例

- ・高速化、省エネの観点から、新幹線車両にて重量削減のニーズが継続
- ・構造面での対策はほぼ飽和状態のため、Alよりも軽量なMgの適用検討が進められている

【Mg合金の特徴】

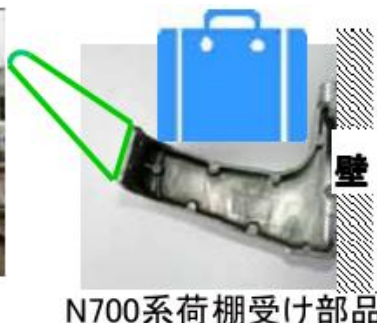
- (○)比重が1.8でAlの2/3、Feの1/4程度と軽量
- (○)Alよりも振動吸収性に優れる
- (×)剛性が低いため、最適な断面形状を考慮する必要がある
- (×)耐食性が低いため、表面処理が必要
- (×)化学的に活性であり、溶接が難しい
- (×)Alよりも高コスト

	引張強さ (MPa)	弾性率 (GPa)	密度 (g/cm ³)
マグネシウム合金 (AZ31合金)	235	45	1.9
アルミニウム合金 (A6N01)	240	70	2.7
CFRP	(繊維平行)	540	1.7
	(繊維垂直)	220	

出典:Railway Research Review 2011.11



JR東海HPより



N700系荷棚受け部品



図2 腰掛完成品

Alに対して5.5kg軽量化(23kg)

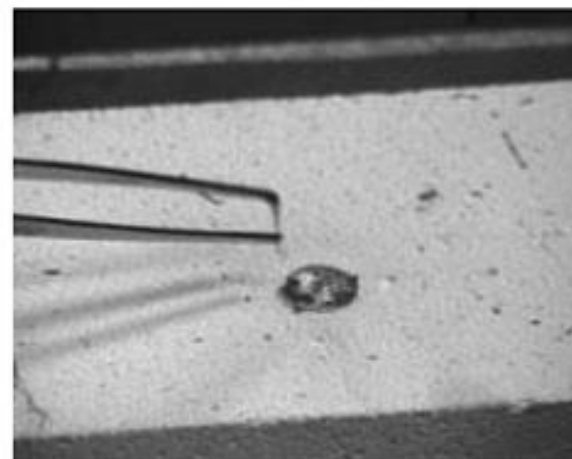


腰掛骨組み

鉄道車両分野でのMg合金の適用例



(a)カルシウム未添加



(b)カルシウム添加
(2mass%)

図6 マグネシウム合金(AM60合金)の難燃性に対するカルシウム添加の影響.

本日の話題

1. 自己紹介
2. 背景
3. 軽量材
 - 3-1. 複合材: 繊維強化プラスチック(FRP)など
 - 3-2. アルミリチウム(Al-Li)合金
 - 3-3. マグネシウム(Mg)
- 4. 軽量化のための材料加工方法**
5. おわりに

FSJ: Friction Spot Joining

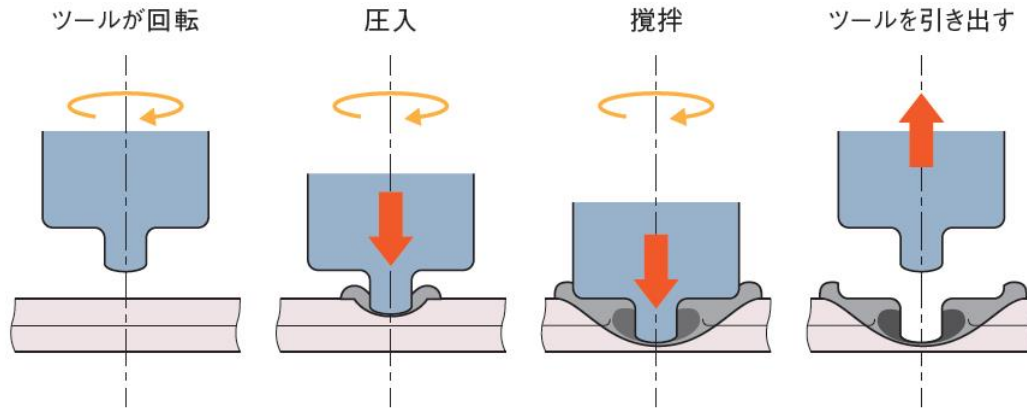


図1 一般的な摩擦攪拌接合の仕組み

円柱の先端に突起を設けたツールを使い、突き合わせた2枚の板(母材)の接合したい部分の上から、同突起を回転させながら押し付けることで、接合する。

- 摩擦熱で母材を軟化させて攪拌し、接合
- 溶接と比べて母材を溶融させないため、ひずみが低減
- ジェット旅客機の全てのリベット接合からFSJに置き換えると7%程度の軽量化が可能
(※使用リベット数: 100万本以上)
- アルミ同士、鋼同士だけでなくアルミ／鋼など異種金属接合も可能

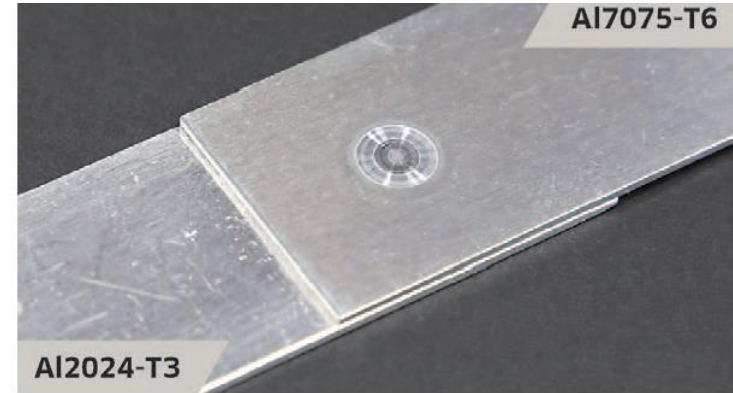


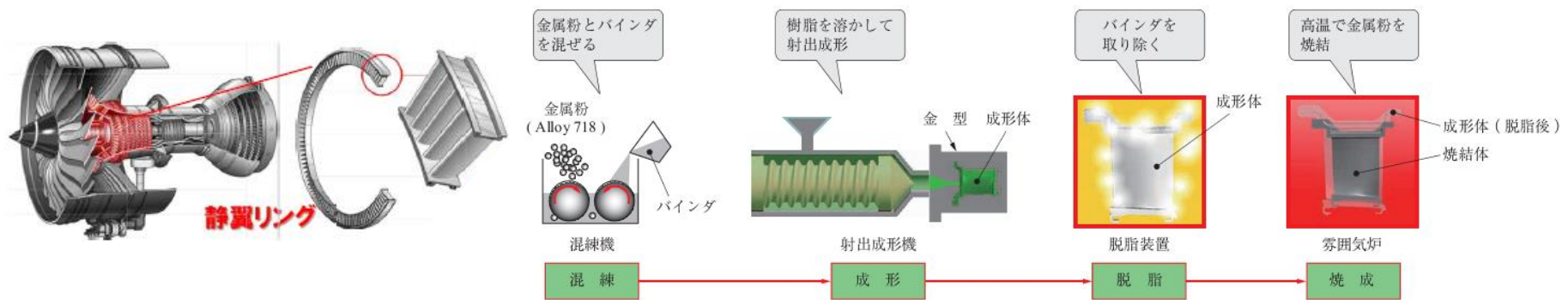
図2 川崎重工の摩擦攪拌接合技術で接合したアルミニウム合金の板

一般的なFSW技術と異なり、接合部に生じる凹みやバリがなく、ほぼ平滑な平面を得られる。

MIMによるニアネットシェイプ成形

- ・高圧圧縮機静翼では難削材のNi系耐熱超合金を使用
- ・空力性能向上のため、薄肉の三次元形状の翼面形状が必要
(組立工程の複雑化)

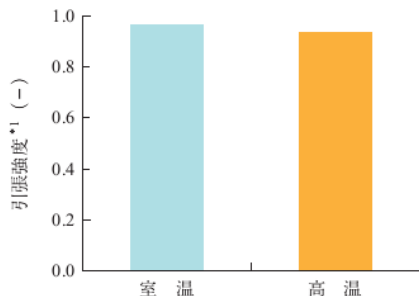
MIM※の適用検討
※Metal Injection Molding
(金属粉末射出成形)



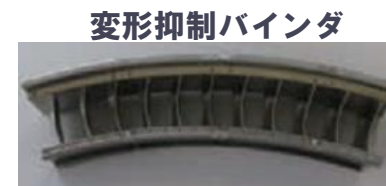
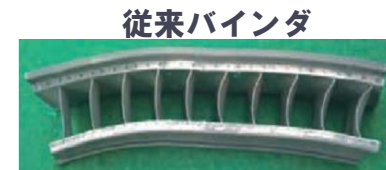
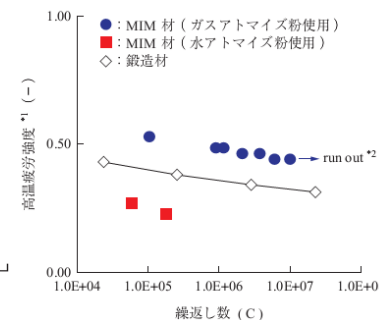
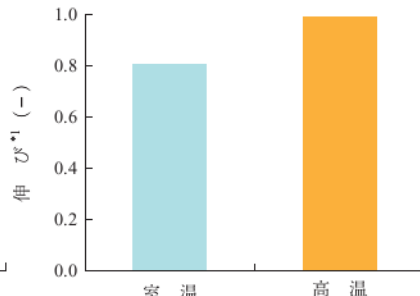
第3図 MIMの製造プロセス

【課題】

- ・合金粉末の特性が焼結後の金属組織（ポロシティなど）に影響
- ・脱脂時のバインダの飛散による形状変形
- ・焼結時のクリープ変形（数g～100g程度の部品への適用が多い）



※1MIM材/鍛造材の比を示す



おわりに

- **輸送機器には地球環境問題から省エネルギー、省資源化が増々求められている。**
- **その解決としての軽量材料や材料加工法について、航空機や鉄道車両への適用例を中心に紹介した。**