

展望

大型航空機用の高圧タービン翼とその修理のこれから

山口 紘 日本タービンテクノロジー(株)代表取締役副社長
Ko Yamaguchi

High Pressure Turbine Airfoil and Its Repair for Wide Body Aircraft

1 はじめに

多数の乗客を安全に長距離輸送できる大型航空機時代が、1970年1月にパンナム社のボーイング747型機（以下B747）の初就航によって開かれてから、既に四半世紀以上過ぎた。その時使用されたのが、プラットアンドホイットニー社（以下P&W）の4基のJT9Dエンジンであった。その後機種も増えたJT9Dは、今なお大型航空機の主力エンジンとして、全世界で3000基も使用されている。

この間、GEエアクラフトエンジン社（以下GE）も大型航空機用のCF6エンジンの機種を拡張し、日本航空や全日空も採用している中心機種CF6-80C2は、2000基ほども世界の空を毎日飛んでいる。ロールスロイス社（以下RR）のRB211エンジンもまた欧州の空を中心に大型航空機時代を支えている。

これら推力21-28トンのエンジンがこれからも長く使い続けられることは間違いないが、今やエンジン業界は新たな高推力エンジン時代へと突入している。P&WのPW4000、GEのGE90、RRのTRENTと言ったエンジンがそれで、これらは最初から45トン級の推力を狙って開発が進められ、既に40トン程度までのエンジンは実用に供されている。

これまでのエンジンで培われた制御システム・監視シス

テム・使用部品などの高度化と信頼性の向上が高推力エンジンの開発を可能にし、日本の航空3社もこぞって導入しつつある、図1に示すB777型機を中心とした双発の大型ジェット機の出現を促したとも言える。表1に日本航空の場合を例に、最新のB747-400とB777-200型機の主要諸元を比較して示した。前者よりは小型とはいえ後者のような大型機が双発で運航されるというのは航空機エンジン技術の進歩を如実に示している。

表1 B747とB777型機の主要諸元の比較

主要諸元	B747-400	B777-200
機体寸法		
＊全長	70.5m	63.7m
＊主翼スパン	64.9m	60.9m
＊全高	19.3m	18.8m
航続距離	13,100km	7,721km
最大離陸重量	395ton	243ton
装着エンジン	CF6-80C2	PW4000
＊基数	4基	2基
＊最大推力	26ton	35ton
＊バイパス比	5.2	6.4
＊ファン径	2.4m	2.8m

当社は、P&WとGEからライセンスを受け、上記エンジンの内、JT9D、CF6-80C2、PW4000の高圧タービン翼の修理を行なう専門会社として、1988年に日本航空と新日本製鐵との共同出資により設立された。以来、1990年に部分操業を開始し、その後も修理資格を拡張しつつ修理品目を増やし、今日ではPW4000のそれを除くほとんどの高圧タービン翼の修理を行なっている。以下に、修理技術の観点からみた高圧タービン翼の技術動向、修理技術の現状と将来を展望する。

2 ジェットエンジンの構造

現在の高バイパス比ターボファンエンジン (High Bypass Ratio Turbofan Engine) の構造は図2に示すように、前方か



図1 2基のPW4000で飛行するB777型機

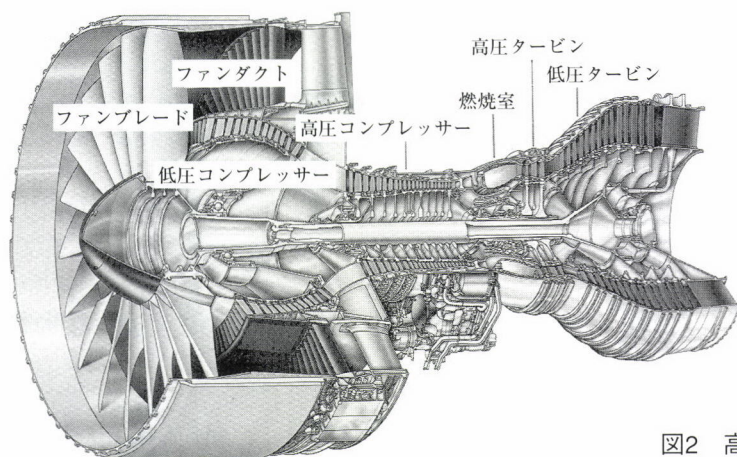


図2 高推力PW4000エンジン(38トン級)のカットセクション

ら (1) ファンブレードと低圧コンプレッサー、(2) 高圧コンプレッサー、(3) 燃焼室、(4) 高圧タービン、(5) 低圧タービンの各部分から構成されている。

推力25トン級のエンジンの例（下記の離陸時の諸数値はエンジン機種で相当異なる）でみると、燃焼室から吹き出される 1350°C ・30気圧程度の高温・高圧の燃焼ガスを受けて、高圧タービンが約10000rpmの高速で回転し、同軸になっている高圧コンプレッサーを回転させ、低圧コンプレッサーで2気圧程度に圧縮された空気を、さらに 600°C ・30気圧程度まで圧縮する。この高温・高圧の圧縮空気が燃焼室に吹き込まれ、ジェット燃料を燃焼させる。

一方、高圧タービンから出てくる、まだ 800°C ・6気圧程度と温度も圧力も比較的高い燃焼ガスを受けて、低圧タービンが3500rpm程度で回転する。この回転が同軸になっているファンブレードと低圧コンプレッサーを回転させる。ファンブレードの回転によって取り込まれる毎秒800kgもの空気の約15%は低圧コンプレッサーに入るが、残りの85%はファンダクトを通過 (Bypass) して、秒速300m位で大気中に排出される。これがエンジンの推力の大部分を占める。

3 高圧タービン翼の技術動向

3.1 構造と使用環境

高圧タービンは燃焼室から高速で出てくる燃焼ガスを最も効率的な流れとするための第1段ベーン（固定翼）、整流されたガスを受けて回転ディスクに取り付けられた状態で高速回転する第1段ブレード（回転翼）、乱されたガス流を再度整流する第2段ベーン、その後ろに位置し第1段ブレードと同軸で回転する第2段ブレードから構成されている。ブレードの外周にはアウターエアシール (Outer Airseal) と呼ばれる部品が配置されていて、ブレード先端はこれに接

触する程の間隙で回転するようになっており、ガス流を効率的に回転エネルギーに変換している。

これらの部品は燃焼室直後に位置するため、エンジンによっては 1350°C を優に越える燃焼ガスに直接曝されるばかりでなく、離陸・着陸時には激しい急熱・急冷の熱応力を受け、ブレードの場合には高速回転による強い遠心力も受ける、など極めて厳しい環境で使用される。

3.2 使用される材料と凝固組織

高圧タービン翼に使用されている材料は全てニッケルあるいはコバルト基の超合金である。エンジン機種・部品・時代によって最適な合金が選択され、真空誘導またはエレクトロンビーム溶解炉で厳密な成分調整下で溶解され、同じ炉内で予熱されたロストワックス精密鋳造鋳型に鋳込まれて製造される。従前は多結晶組織材のみであったが、1970年代初めから1方向凝固材が、1980年代初めには単結晶材が実用化され、今日ではこれらが多用されている。多

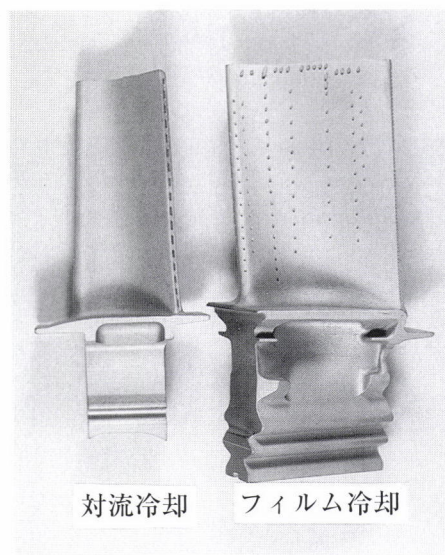


図3 ブレードの冷却方式

結晶から単結晶への進歩により耐熱特性が約140℃改善されたと言われる¹⁾。

3.3 冷却技術

このような材料が使われていても、部品が曝される温度が高過ぎるため冷却が不可欠である。全ての高圧タービン翼は中空であり、高圧コンプレッサーから分岐された冷却空気によって以下のような方法で内部から冷却されている。

- 1) 対流冷却（根元の開口部から冷却空気を入れ、部品の端部から出す方法）
- 2) 衝突冷却（小さな孔が多数開いた中空の中子を部品内部に挿入・固定し、その中子を通して冷却空気を部品内壁に衝突させる方法）
- 3) フィルム冷却（翼内部から外部へ貫通する複数の冷却孔列を開け、この孔から吹き出す冷却空気層が部品外部表面を覆うようにする方法）

図3に初期の対流冷却のブレードと最近のフィルム冷却が多用されているそれとを対比して示した。このような冷却技術の進歩により、部品が曝されても良いガス温度を390℃程も上昇させることが出来たと言われる¹⁾。

3.4 耐酸化皮膜と熱遮蔽皮膜

3.4.1 耐酸化皮膜

(1) 皮膜の役割

上述のように高度な材料・冷却技術が駆使されているにもかかわらず、そのままでは燃焼ガス温度が高いため高圧タービン翼の急速な高温酸化・腐食は避けられない。そこで、12-35%のアルミニウムを含有する皮膜で全ての高圧タービン翼の外部表面を覆っている。中空の内部表面もこの皮膜で覆われている部品が多い。

酸化により緻密なアルミナ層を部品表面に形成させ、それ以上の酸化の進行を防ごうとするものである。たとえば、一旦形成されたアルミナ層が熱・機械的応力により剥離したり、酸化層を燃焼ガスが浸透しても、皮膜中のアルミニウムで新たなアルミナを形成させて酸化の進行を遅らせる仕組である。

(2) アルミナイド皮膜

ニッケル・アルミナイド (Ni-Aluminide) 皮膜はNiAl金属間化合物（コバルト基超合金の場合はCoAl）を主成分とする皮膜で、アルミニウムを母材に蒸着・拡散させて形成する。古くから実施されているパックコーティング (Pack Coating) 法では部品をアルミ合金・アルミナ・塩（弗）化アンモニウムの混合粉末中に埋め込み、中性雰囲気中で加熱することにより塩（弗）化アルミニウムを発生させ、部品表面にアルミニウムを析出させている。最近ではガス発生

装置から所定のガスを炉内に導入し、化学的に蒸着させるいわゆるCVD法（Chemical Vapor Deposition）も部品内外表面への皮膜形成に使われはじめた。

プラチナ・アルミナイド (Pt-Aluminide) 皮膜は、予めプラチナメッキをした部品を上述のパックコーティング法またはCVD法によりPt-Al-Ni からなる皮膜を形成させたものである。これは1970年代に開発された皮膜であるが、CF6-80C2エンジンで当初はニッケル・アルミナイド皮膜であったが、ブレードの耐高温酸化特性を改善する必要があった、この皮膜に変更されたことで今また注目されている。

(3) ニコクラリ皮膜

ニコクラリ皮膜 (Ni,Co,Cr,Al,Yを主成分とするのでこのように呼ばれる) はP&Wのエンジンで多用されている。当初はエレクトロンビームで皮膜成分の合金を蒸発させて物理的に部品表面に蒸着させるEB-PVD法 (Electron Beam Physical Vapor Deposition) で形成されていたが、1980年代から次第に減圧下でプラズマ溶射するLPPS法 (Low Pressure Plasma Spray) による形成に置き換えられ、今では全てこの方法によって作られている。EB-PVD法ではその蒸気圧が低すぎるため添加出来なかったハフニウム（生成したアルミナ層の剥落防止に顕著な効果があると言われる²⁾）をLPPS法では容易に添加できる、設備費と形成コストがEB-PVD法は高価に過ぎるなどの理由による。

3.4.2 熱遮蔽皮膜

熱遮蔽皮膜（イットリアで部分安定化させたジルコニア皮膜）は150ミクロン程度の厚さで母材の表面温度上昇を140℃も抑えられると言われる^{1), 3)} ことから、以前より冷却のしにくいベーンの側面に大気中でプラズマ溶射するAPPS法 (Air Pressure Plasma Spray) によって一部適用されてきた。その優れた断熱効果からPW4000エンジンではベーンの外部表面全体にこの皮膜が採用されている。この

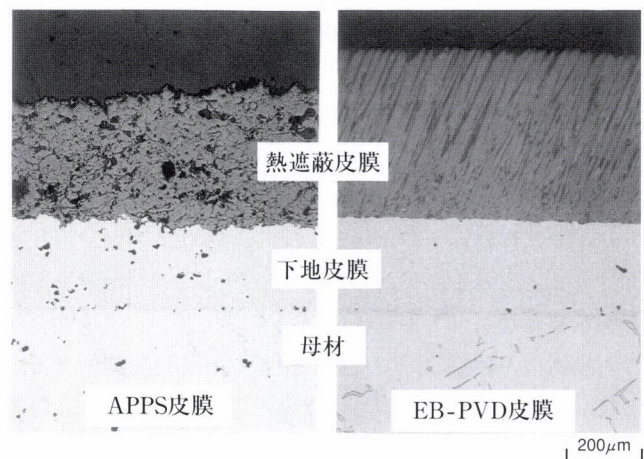


図4 熱遮蔽皮膜の組織

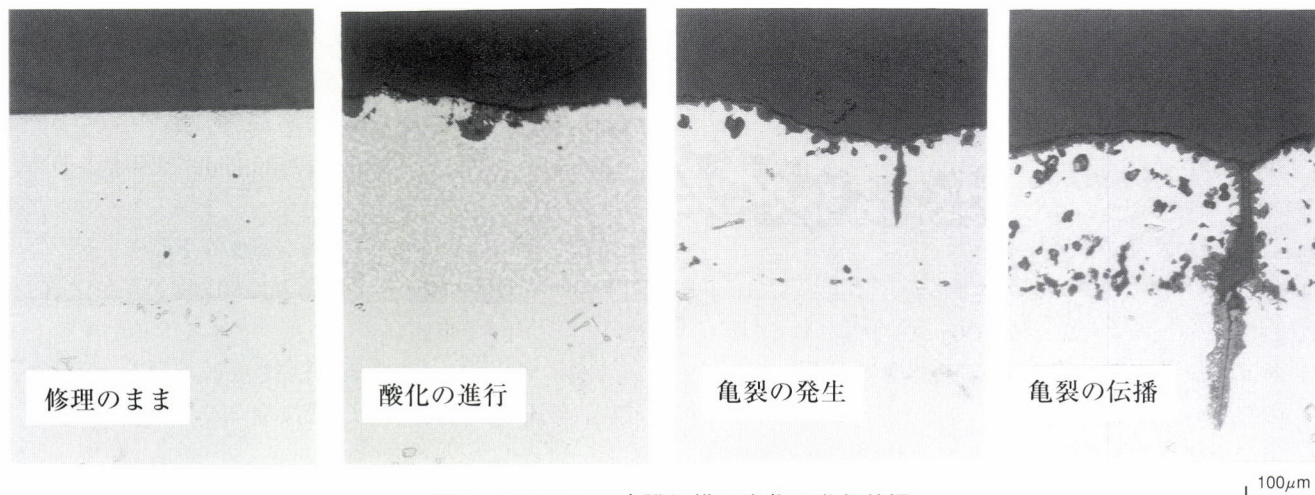


図5 ニコクラリ皮膜組織の劣化の進行状況

皮膜は図4に見られるように層状であり、気孔率も高く高速回転するブレードへの適用は到底考えられなかった。

しかしながら、EB-PVD法による熱遮蔽皮膜の開発はブレードへの適用を可能にし、今や最も注目を浴びている技術である。図4に示すように柱状の組織が特徴であり、熱・機械的な繰り返し応力に強く、懸念される剥離が生じないとされている^{3), 4)}。最初にP&Wによりペーンに適用されたこの皮膜は、その優れた使用成績からJT9Dのブレードで試験的に採用され、今やPW4000エンジンでは必須の皮膜として採用されている。GEとRRも既にこの皮膜をオプションベースで採用しはじめている。

4 修理技術の動向

4.1 何故修理が必要か

上述のようにして製造される高圧タービン部品であるが、非常に厳しい使用環境で使われるため経年劣化はある程度止むを得ない。酸化や腐食による耐酸化皮膜の劣化、熱・機械的応力の繰り返しによる母材の割れの進行、大量の冷却空気に含まれる粉塵のブレード内部先端への堆積、アウターエアーシールとの接触回転によるブレード先端の摩耗や割れなどが、数千時間から2万時間程度の使用により次第に進行する。

図5にニコクラリ皮膜の劣化の例を示すが、修理直後の組織と比較して、酸化が進行すると共に組織が粗大化し、亀裂が発生して母材にまで亀裂が伝播する様子が判る。ブレードでは母材にまで亀裂がおよぶと修理は困難でありスクラップとされる。これらの部品は新品で一つが数十万円もする高価なものであり、使い過ぎてスクラップになる前に新品価格の数分の一で皮膜の更新などを行い再度あるいは数回使用の方がはるかに安全かつ経済的であり、修理が一般的に行われる理由である。

4.2 修理工程と修理資格

航空会社は飛行中のエンジンの状況を常時電子的にモニターするとともに、定期的に地上で内視鏡などを用いて部品の状況をモニターする。何らかの異常が発見された場合、エンジンは機体より取り卸され、必要に応じ部品単位にまで分解点検される。使用時間が定められている部品もあり、その交換のために計画的に取り卸され分解点検される場合も勿論ある。

航空会社によってエンジン整備の仕方は様々であるが、高圧タービン翼については専門会社に修理を依頼するのが最も一般的ようである。当社では、部品単位で依頼を受けその概略を表2に示す工程（実際には40-60工程）により修理する。

修理を行うためには、部品毎にまたその主要修理技術毎にエンジンメーカーの厳格な資格認定試験に合格しなければならない。設備の適合性審査、修理方法の詳細な記述の審査、試験操業のデモンストレーション、試験操業部品のメーカーによる非破壊・破壊検査、定期的な設備・操業状況審査などが行われる。

海外航空会社の部品を修理するためには、米国連邦航空

表2 高圧タービン翼の修理工程の概略

ペーン	ブレード
受け入れ検査	受け入れ検査
↓	↓
変形の修正	旧皮膜の除去
↓	↓
旧皮膜の除去	翼内部の洗浄
↓	↓
亀裂・溶損部の溶接	翼先端の整形
↓	↓
亀裂の拡散接合	翼先端への肉盛
↓	↓
接合部の手仕上げ	肉盛部の手仕上げ
↓	↓
冷却孔の穿孔	皮膜の更新
↓	↓
皮膜の更新	皮膜表面仕上げ
↓	↓
中子の取り付け	析出硬化処理
↓	↓
完成検査	完成検査

局や欧州連合航空局などの修理工場認定が必要であるが、これらの機関は厳密な品質保証体制を求めている、当社はそれに見合う体制を整備して、既に双方から認定されており、定期的に更新検査を受けている。

4.3 主要な修理技術

4.3.1 内部洗浄

強度と冷却効果を両立させるためブレード内部は非常に複雑な構造となっており、冷却空気中の粉塵が堆積する場合があります、これを高温・高圧のアルカリ溶液で膨潤させ高圧水流で取り除く必要がある。

4.3.2 TIG溶接

TIG溶接は大きな亀裂の修理、ブレード先端の肉盛りなど修理工程で重要な役割を占めている。母材や皮膜への熱影響を極力避ける目的から低電流溶接が必須であり、交流TIG溶接も使用される。難溶接材の溶接には部品を高温に加熱した状態で行うなどの手法も用いられる。

4.3.3 液相拡散接合

ベーンには微細な亀裂が多数発生する場合が多い。これらの亀裂を溶接で修理することは事実上不可能であり、液相拡散接合法で修理する。この方法は、

- 1) 亀裂内部の酸化物を高温の水素または弗化水素ガスで還元した後、真空洗浄し、
- 2) 母材成分と同様の合金粉末とそれに若干のボロンを含有させた合金粉末とを練り合わせたペーストを亀裂に擦り込み、
- 3) 高真空下で加熱することにより、ボロンの顕著な融点降下作用でペーストを溶融させて亀裂内に浸透させ、その後の拡散熱処理でボロンを拡散させると共に組織の均一化を行う、ことからなっている。

母材とほぼ同等の組織・高温強度が得られるこの方法は今やベーン修理の必須技術の一つとなっている。微細な亀裂が冷却孔近傍に発生しやすいこともあり、殆ど全ての冷却孔をこの方法で埋めて再穿孔することも常時行われる。ペースト状だけでなく、真空焼結で板状にしたものやテープ状のものも開発されておりベーン形状の修復や摩耗部の肉盛りにも応用されている。

4.3.4 溶射肉盛り

アウターエアシールとの接触回転で摩耗するブレード先端は通常溶接により肉盛りされるが、残存肉厚が少ない場合には溶け落ちの可能性が高く、LPPS法により肉盛りする。P&W部品では摩耗したアウターエアシールの表面もまたこの方法で修復される。その他、摩耗しやすい部位に

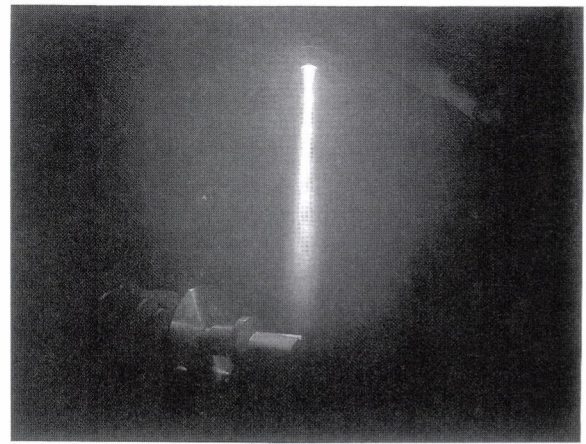


図6 ニコクラリ皮膜の減圧プラズマ溶射（LPPS）状況

はAPPS法によりクロムカーバイドやタンゲステンカーバイド系の耐摩耗皮膜を肉盛りして修復する。

4.3.5 冷却孔の穿孔

修理過程で埋められた冷却孔は穿孔しなおさねばならない。特に拡散接合でほぼ全ての冷却孔を埋めてしまう現在の修理方法では、効率的な穿孔技術が必須であり、レーザ穿孔が主に用いられる。コンピューターに対象部品の全孔の位置・角度・孔径と穿孔パラメーターを入力しておき自動穿孔する。

4.3.6 皮膜の更新

大方の修理が終わったところで、新品部品を製造する時と同様の方法で耐酸化皮膜、熱遮蔽皮膜を更新する。当社はLPPS、APPSおよびパッキンコーティング設備を保有して皮膜の更新を行っている。図6はLPPS法でブレードにニコクラリ皮膜を溶射している状態を示している。最近の高圧タービン翼は前述のように冷却孔が多く、皮膜の更新時に冷却孔径が皮膜によって狭められ、そのままでは所定の冷却空気量を確保するのが難しい。そのため種々の手法で予め孔径を大きくしておく、あるいは狭まった孔を拡大する作業などが必要であり修理は益々複雑になっている。

4.3.7 検査

最高の安全性を求められる高圧タービン翼であるため、修理工程での検査には万全を期す必要がある。修理可否判断に始まり、部品状況に応じた修理工程の設定、修理途中で初めて見えてくる欠陥の処置判断、次工程で隠されてしまう欠陥の発見と修理指示、修理部品が使用可能であることを保証する完成検査などきめ細かい何回もの検査が必要である。非破壊検査では検査できない品質（皮膜の組織、界面状況など）については、ロット毎に同時に処理するサンプルの顕微鏡観察により確認する。

5 おわりに

エンジンメーカーも軍需の減少から民間航空機の整備事業に積極的に乗り出している。航空会社のエンジン整備でも、外注化・分社化・航空会社間の整備協力などを含めた合理化が求められている。部品の修理価格の低減や修理日数の短縮要請は益々高まっている。修理技術が上述のように高度化・複雑化する中、修理品質を確保しつつ、これらの要請に如何に答えられるかが修理会社の将来を制するといえる。

導入されつつある高推力エンジンはさらに様々な新しい修理技術の開発を要求することになろう。また、従前はエンジンメーカーの規定した修理方法でしか部品の修理は出来なかったが、米国では修理会社が開発した修理技術を米国連邦航空局が認定すればそれを使用出来る道が開かれている。既に大手の修理会社では独自に開発した技術を使い始めており、今後益々激しい技術開発競争が展開されて行くものと思われる。

当社が修理したタービン翼は日本航空の大部分の、また

海外航空会社の一部のエンジンにも使用されている。当社で修理され、長時間実使用され、また修理に帰ってきている部品も増えている。これまで全くの無事故、好成績で使用されてきているが、これに満足することなく、上述の事業環境を踏まえ、修理技術のさらなる向上を計って行きたいと考えている。

最後に、日本航空とP&Wから一部の写真、データなどを提供頂いたことを付記し、謝意を表する。

引用文献

- 1) J.Smith:Presentation at 1995 Technical Symposium, Howmet Refurbishment Inc.
- 2) D.Gupta and D.Duval:United States Patent 4,585,481;Apr. 1986
- 3) S.Meier and D.Gupta:ASME paper 92-GT-203
- 4) G.Goward,D.Grey and R.Krutenat:United States Patent 4,248,940;Feb.1981

(1996年6月11日受付)