先進超合金柱状晶・単結晶ガスタービン翼の開発

太田 芳雄¹⁾ 中川 幸也²⁾ 本多 弘³⁾
大浜 信一⁴⁾ 大友 暁⁵⁾

1. 開発の背景

ジェットエンジンや産業用ガスタービンでは、タービン入口温度が推力や燃焼効率を決定する直接的因子であり、タービンの高温部に使用される材料はより高い温度に耐えることが強く望まれている。タービン動翼の耐熱温度の向上の変遷を図1⁽¹⁾に示す。同図に示されているように1960年代の半ばに米国、PWA社のVerSnyderら⁽²⁾によって、一方向凝固法が提案され、実用化研究期間を経て、1980年代に入って航空機用ガスタービンにおいて、一部の機種に実用化がなされて来ている。例えば、単結晶タービン翼はJT9D-7R4Dエンジン用高圧1段タービン翼(航空機、B767)が1982年からフライトに入っている。また、JT9D-7R4Hエンジン用高圧タービン1段動翼(航空機、B747-300, A310S)が1983年からフライトに入っている⁽³⁾。ところで、これらの技術を含めて先進素形材技術は、最近、ノウハウの禁輸として戦略的に用いられる傾向が強まっており、我が国独自の自主開発に頼らざるを得なくなっている。このよ

図1 タービン動翼材の製造法と強度の向上。

* 石川島播磨重工業株式会社

1) 技術研究所研究員 2) 技術研究所課長 3) 航空宇宙事業本部スタッフ 4) 航空宇宙事業本部スタッフグループ部長 5) 技術研究所スタッフグループ部長

Development of Advanced Columnar and Single Crystal Turbine Blade; Y. Ohta, Y. G. Nakagawa, H. Honda, S. Ohama, A. Ohtomo (Ishikawajima Harima Industries Co. Ltd.)

1990年1月29日受理

2. 開発の経緯

開発の当初、筆者らは図2⁽⁴⁾に見られるようなPD(パワーダウン)法を用いて実験室の規模での実験に着手した。パワーダウン法は鋳型加熱炉が上下の2段に分割してある方式で、鋳型上部が十分に加熱され、鋳型上部温度が合金融点より100 K以上に達すると注湯する。その後はチル板を通しての吸熱により鋳物底部は固相となり、引き続いて下部ヒーターおよび上部ヒーターの出力を徐々に低下させることによって凝固を進行させる。凝固はヒーターの輻射熱量とチル板を通じての熱伝導による吸熱の相対比によって制御されるため、通常はプロセス時間も長く、凝固界面がチル板より遠ざかるにつれて温度勾配も減少するため高翼長の製品の鋳込みは難しい。しかし、PD法は基礎的な研究方法の確立には有効で、一方向凝固法の技術取得に役立った。その後、温度勾配を更に高めることによって、DSの凝固速度を高め、更にシュリンケージの防止など鋳物としての品質向上を計ることが出来る高速凝固法によるプロセス開発を行った。高速凝固法(図2参照)は鋳型およびチル冷却系が駆動装置により、鋳型加熱炉外に引き出されることによりチル板からの熱吸収に加えて、炉外に出た鋳

図2 一方向凝固装置。

型面からの輻射により放熱量を増し、凝固後半の過程でも急激な温度勾配を維持することができる。したがって、生産性が向上するほか、高翼長の鋳物が製造できること、温度勾配と凝固速度を分離して制御できるなどの利点がある。

ところで、我が国の航空機用素材の開発は昭和50年代より徐々に活発化している。タービン材料では2つの通商産業省・工業技術院のプロジェクトとしてのムーンライト計画、高効率ガスタービンの研究開発および次世代産業基盤技術研究開発制度の高性能結晶制御合金の研究開発の寄与が大きい。これ等のプロジェクトでは、いずれもニッケル基超耐熱合金の開発が含まれており、金属材料技術研究所(合金設計を担当)および多数の企業(プロセス開発)の参画により、次々と世界でも最先端の性能を有する合金が生み出されてきている。筆者らは、前者のプロジェクトにおいて、一方向凝固柱状晶(DS)翼の製造技術の開発を担当した。DS翼の開発では金属材料技術研究所に協力して世界最強レベルの柱状晶専用合金(TMD-5)を完成させた。同時に、既存の一方向凝固専用合金 Mar-M247LC(米国、キャノンマスケゴン社)および TMD-5 合金の各種の高温強度(高温引張、クリープ、高サイクル、低サイクル疲労)特性データおよび物理的特性(比重、比熱、熱膨張係数、熱伝導率およびヤング率)を明らかにして、両合金とも高効率ガスタービンの動翼として目標性能を十分に満たす DS 翼が製造できることを確めた。そこで、両合金とも高効率ガスタービン実機への適用運転が行われた。DS 翼としては、我が国で初めての実機プラントの採用運転であり、タービン入口温度:1400℃で本プロジェクトの最終目標である総合発電効率55%の見通しを得ることに寄与した。このように、高性能耐熱合金の使用により、タービン入口温度の高温化が期待でき、また現有のものと同じ条件ならば寿命の増大あるいは信頼性の向上が可能となる。高効率ガスタービンプロジェクトの成果は発展的に次世代基盤技術研究開発制度による高性能結晶制御合金の一つでもある単結晶超耐熱合金の製造技術開発にも引き継がれた。ニッケル基超耐熱合金の単結晶化技術も、基本的には一方向凝固法技術の延長にある。筆者らは単結晶用実験炉として図3⁽⁵⁾に示すような装置を開発した。本装置の特徴は合金の溶解にプラズマ・ビームを用いたスカルメルトを用い、合金溶解時のルツボからの汚染を防ぐと共に、鋳型加熱炉には抵抗炉を用いて溶湯の乱れを少なくすることを考慮した点である。同時に、制御・データ処理系としてプログラマブル・シーケンサとパーソナルコンピュータを用いて、鋳型の設置および取り出し以外は自動運転が可能である方式とした。凝固制御過程のパラメータ表示結果の一例を図4に示す。凝固制御と同時に、単結晶部品の製造のためにはセレクトーが重要な役割を果たす。セレクトーは柱状晶群のスタ

図3 単結晶用実験炉の構成。

図4 一方向凝固過程の計測演算データ例。

ータ・ブロックの直上に位置され、図5に示すような各種の方式が提案されている。セレクトーの条件としては、セレクトー内で一方向凝固が進行し、鋳型壁から新しい核生成が生じないように設計されている必要がある。タービン翼では、通常、翼長方位が<001>にあることが望ましいが、スタータ・ブロックや注湯条件にも影響を受ける。筆者らは、各種の試作によるパラメータ・サーベイを行うと同時に、凝固過程のシミュレーション計算を通じて、単結晶化率や結晶方位の制御性の良い技術を開発した。図6に一方向凝固法によるタービンブレードの試作例を示す。

図5 単結晶化の鋳型方案例。

図6 タービンブレードの試作（左端：普通铸造，中央：一方方向凝固柱状晶，右端：単結晶）。

3. 一方方向凝固材の特性例

前述のように DS 材 (Mar-M247LC および TMD-5 合金) の各種強度特性や物理的性質に関する多くのデータは高効率ガスタービンの設計データとして用いられた。同時に SC 材についても、既存合金の Alloy 454, CMSX-2 や第 2 世代合金として高強度指向合金である CMSX-4, MXON 合金について特性調査を行った。その結果、次世代プロジェクトで開発された TMS26 合金は現在、世界最強クラスの合金であることを明らかにした。単結晶 (SC) 合金については、特にクリープ強度の異方性が中間温度域 (750~850℃) で著しいが、その挙動について検討を行った。特に $\langle 111 \rangle$ 方位の結晶では Mackey らの報告で最強とする報告⁽⁶⁾があったが、析出物 (γ') サイズの影響が大きく、析出物形状によっては弱い方位にもなることを明らかにした。図 7 は Alloy 454 の約 0.5 μm の γ' サイズを有するクリープ強度の領域分けを示したものである⁽⁷⁾。また、図 8 に CMSX-2 合金の γ' サイズがクリープ特性に及ぼす影響例について示した⁽⁸⁾。 γ' サイズは溶体化処理および時効処理条件を変えることにより制御が可能であるので結晶方位によっては異った熱処理条件を施すことにより最適材質を得られることなどを指摘した。

4. 実績および将来性

前述のように高効率ガスタービンのプロトタイプブラ

(注) (011) と $\langle 111 \rangle$ 近くは両者とも低強度であるが、変形機構が異なる

図7 Alloy 454 の760℃におけるクリープ強度異方性。

図8 γ' サイズがクリープ特性に及ぼす影響 (760℃, 750 MPa)。

ントの第 2 次、第 3 次 HTDU (高温・高速タービン試験装置) への一方方向凝固柱状晶 (DS) 翼への適用をはかり、実機でのプラント運転で何ら支障なく目標を達成した。DS 翼の実機プラントの適用は我が国で初めてであり、世界的にも例は少ない。全面的に海外に依存してきた、この種分野で国産技術を持つことができたことは重要である。その後、DS 翼については特定機種で実用化段階に入っており、SC 翼についてもエンジンテストの段階にあり、近い将来、実用化が達成される状況にある。今後、更に国産エンジンの開発やエンジンの高温高圧化の傾向にあることから、一方方向凝固法によるタービン翼は需要を増大していくものと考えられる。

なお、本研究開発の一部は通商産業省・工業技術院の次世代産業基盤技術研究開発制度に基づき、(財)次世代金属・複合材料研究開発協会が NEDO から委託を受けた「高性能結晶制御合金の研究開発」の一環として行われたものである。

文 献

- (1) R. F. Decker: Proc. 4th Intl. Symp. Superalloys, Seven Springs, March (1980).
- (2) F. L. Snyder, R. B. Barlow, L. W. Sink and B. J. Pearcey: Modern Castings, **50**(1967), 360.
- (3) Diesel & Gas Turbine Worldwide, June (1983), 58.
- (4) 中川幸也, 大友 暁, 雑賀喜規: 日本金属学会会報, **17**(1978), 589.
- (5) 太田芳雄, 中川幸也, 大友 暁, 雑賀喜規: 日本金属学会会報, **24**(1985), 462.
- (6) R. A. Mackey and R. D. Maier: Met. Trans., **13A**(1982), 1747.
- (7) 中川幸也, 寺島久恵, 吉沢広喜, 太田芳雄, 村上和夫: 石川島播磨技報, **25**(1985), 1.
- (8) P. Caron, Y. Ohta, Y. G. Nakagawa and T. Khan: Proc. 5th Intl. Symp. Superalloys, The Metallurgical Society Inc., (1988).