巻頭言

特集：最新のガスタービンにおける修理・補修技術

「最新のガスタービンにおける修理・補修技術」特集号によせて

原田　広史*1
HARADA Hiroshi

高効率の天然ガスコンバインドサイクル発電の主機として用いるガスタービンには，入り口ガス温度1500℃のものがすでに実用化されているが，さらに1600℃のものも開発され，現在1700℃を実現させるべく研究が進められている。このような高温化に伴って，ガスタービン部品の使用環境はいっそう過酷になっている。それに対応して，例えば第一段のタービン翼材は，従来の普通鋳造材から一方向凝固材へ，さらには単結晶凝固材へと進化し，同時に価格も上昇しつつある。そのため，コストパフォーマンス向上の観点から，ガスタービン部品の修理や補修の重要性は高まる一方である。

加えて，昨年2011年３月11日の東日本大震災後の福島第一原子力発電所の事故に端を発し，2012年５月５日以降，我が国は国内の電力供給の約30％を担ってきた原子力発電がすべて停止するという非常事態に陥っている。その失われた電力供給を補うために火力発電設備への負荷は増大しており，老朽化した設備も総動員しての電源確保の努力が続いている。必然的に運転中のトラブルの頻度も以前に比べて高くなっており，その中にはガスタービンに関連するものも含まれているようである。本特集号にご執筆いただいた方々をはじめ本会会員の方々には，緊急の修理などトラブル対応にご尽力いただいている方もいらっしゃるのではないだろうか。

経済産業省の審議会がまとめた「2030年の電源構成の選択肢」によれば，選択肢１の原子力０％，同２の約15％，同３の約20～約25％のいずれのケースにおいても，火力発電とコジェネレーションを合わせた電力構成比として約50～65％の高い数字を期待されている。CO_2削減等の観点から，このうち多くは高効率ガスタービンを主機としたシステムが担うことになり，ガスタービンの役割は従来以上に重要になるであろう。以上のような状況において，これからもガスタービンの修理と補修技術の開発と現場への効果的な適用の重要性はますます高まるものと考えられる。

航空エンジンにおいても，エンジンビジネスの約50％を占めるとされるアフターマーケットの部分での経費節減が航空会社の懸案となっている。特に高圧タービンは，クリープ，疲労，酸化，高温腐食などを生じる過酷な環境で稼働するため，タービン翼などの部品の損傷，消耗も激しく，その修理・補修や部品供給などがアフターマーケットの中のかなりの部分を占める。純正タービン翼の購入価格は一枚で100万円にもなるため，自社での修理・補修技術開発はもちろん，より低価格の非純正部品の導入なども現実的な選択肢として検討が必要になっているのが現状であろう。

非純正タービン翼の製造は，実用タービン翼をスライスして外形や内部冷却孔などの形状をデジタル計測したうえで再現するリバースエンジニアリングの方法などを用いて行われている。従来は一部の部品メーカーがOEM（Original Equipment Manufacturer）のエンジン部品を対象に行っていた非純正部品製造であるが，最近はOEMが他のOEMのエンジンを対象として行うようなケースも出てきているなど，ビジネスチャンスを求めて欧米では活発に行われるようになっている。

非純正部品の導入や独自の修理・補修技術の適用は，一方で，OEMのビジネスモデルを壊しその収益を減ずることにもなるので，OEMとの間に軋轢を生じる原因にもなる。そのようななかでエアラインには，非純正部品や新しい修理・補修技術を自信をもって選択するだけの技術力と決断力が必要となっている。航空エンジンの場合，高圧タービンに国内重工メーカーが参画できていない点で技術的な弱みがある。しかし，高圧タービン部材，コーティングなどの材料技術に関してはむしろ我が国が海外をリードする部分もあるので，国内の有効な連携が，独自の修理・補修技術に繋がる可能性もある。

本特集号は，このような状況において，安全性や信頼性の確保はもちろんのこととして，そのコストパフォーマンス向上の点で重要性がますます高まっているガスタービンの修理と補修について，最新の技術開発状況を，発電ガスタービン，航空エンジンの開発あるいは運用の専門家に依頼して紹介していただくものである。ガスタービンに関係しておられる幅広い読者の方々に必読の特集号となるものと大いに期待するところである。

原稿受付　2012年６月25日
＊1　物質・材料研究機構 環境・エネルギー材料部門
〒305-0047　つくば市千現１－２－１

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

特集：最新のガスタービンにおける修理・補修技術

ガスタービン翼の補修技術開発

日野　武久[*1]　HINO Takehisa
河野　渉[*1]　KONO Wataru
伊藤　勝康[*2]　ITO Shoko

キーワード：ガスタービン，動翼，再熱割れ，ひずみ時効割れ，レーザ粉体肉盛溶接

1．まえがき

ガスタービン動／静翼は高温の燃焼ガス温度にさらされるため，静翼では熱応力によるき裂や酸化による損傷，動翼では先端部にエロージョン，酸化による減肉，プラットホーム部にき裂などの損傷が生じる。図1に動翼の損傷箇所を例として示す。これら動／静翼に発生したき裂や減肉部は通常肉盛溶接により補修され繰返し使用される。

しかしながら後述のようにAl，Ti添加量の多いNi基超合金は溶接性が悪く，溶接補修を困難なものとしている。ここでは，主に動翼に使用されている析出強化型Ni基超合金に注目し，溶接時に発生する割れについてまとめるとともに，当社にて開発した動翼先端およびプラットホーム部の補修方法について紹介する。

図1　実機運転後の動翼外観

2．Ni基超合金に発生する溶接割れ

Ni基超合金の溶接割れには溶接時に発生する高温割れ（溶接金属の凝固割れと溶接熱影響部の液化割れ）と溶接後の熱処理において発生する再熱割れがある[(1)]。高温割れは，主として溶接時に低融点の液膜が形成することにより生ずる。液膜は低融点共晶の形成，析出物の局部溶融，微量元素の偏析などによるものと考えられる[(1)]。

再熱割れは溶接後に熱処理を行う過程で発生する割れである。析出強化型Ni基超合金は一般に溶体化熱処理した状態で溶接され，その後，再度，溶体化熱処理，時効熱処理によりγ'相を析出強化して使用されるが，溶接後に溶体化温度へ加熱する過程で溶接割れが発生しやすく，溶接後熱処理割れあるいはひずみ時効割れとも呼ばれている[(1)]。再熱割れの発生メカニズムを模式的に示したものを図2に示す[(2)]。溶接時に溶接部および溶接熱影響部が高温になりそれが室温まで冷却されることによって溶接残留応力が導入される。その後，溶体化熱処理を行うと，残留応力は緩和されるものの，同時にγ'相が析出することで材料の延性が低下し，その結果，溶接割れが発生する[(2)]。γ'相による強化が大きく，γ'相の体積率が大きければ，割れ感受性は高くなる。表1に産業用ガスタービンにて一般的に使用されている動翼材料の合金組成[(3),(4),(5),(6)]，図3に溶接性に与えるAl，Ti添加量の影響を示す[(7)]。Al，Ti添加量が多いとγ'相の体積率が高くなり，その結果，割れ感受性が高くなる。図に示

表1　産業用ガスタービンに使用されている動翼材の合金組成[(3),(4),(5),(6)]

	Cr	Co	Mo	W	Ta	Re	Al	Ti	Hf	Ni	その他
IN-738LC	16	8.5	1.7	2.6	-	-	3.4	3.4	-	Bal.	C0.17,Nb0.9
GTD-111	14	9.5	1.5	3.8	2.8	-	3	4.9	-	Bal.	C:0.1,B0.01,Zr0.05
GTD-444	9.8	7.5	1.5	6	4.8	-	4.2	3.5	-	Bal.	Nb0.5,C0.09B0.009
Rene'N5	7	7.5	1.5	5	7	3	6.2	-	0.15	Bal.	

原稿受付　2012年5月23日
＊1　㈱東芝　電力社会システム技術開発センター
〒230-0045　横浜市鶴見区末広町2－4
＊2　㈱東芝　電力システム社

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

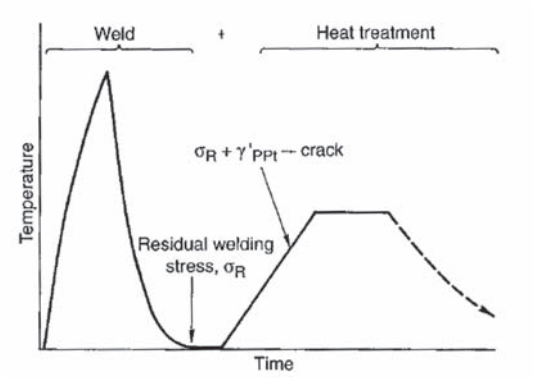


図２　再熱割れの発生メカニズム

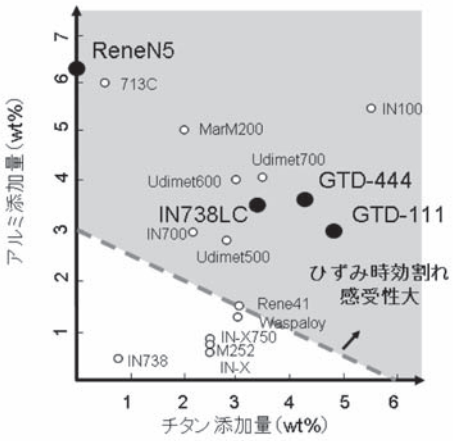


図３　ひずみ時効割れ感受性に与えるAl,Ti　添加量の影響[7]

すように現在使用されている動翼材はいずれも難溶接材に分類される。

表２に再熱割れの原因とその対策[1]を示す。上述のAl, Ti添加量の増加による(1)母材の割れ感受性の増加のほかに，(2)過大な残留応力，(3)不適当な熱処理などが原因として考えられる。

溶接時の収縮ひずみは肉盛時の溶解量が多くなれば大きくなる。このため溶接時の入熱を下げ，溶解量を少なくすれば，残留応力を低減することができる。

図４は溶接割れに与える溶体化熱処理時の加熱速度の影響を検討した結果[1]である。昇温速度を速くすることにより γ' 相の析出領域を避けるような熱処理を行うことができれば再熱割れの発生は抑制可能と考えられている。

３．Ni基超合金の補修方法

溶接割れ防止の点からガスタービン動翼の肉盛補修は，一般に下記の①～③の方法によって行われている[8],[9],[10],[11]。

① 固溶強化型Ni基超合金を用いた肉盛補修[8]
② 溶接近傍部の予熱を行う肉盛補修[9],[10]
③ 低入熱肉盛手法の採用[11]

固溶強化型Ni基超合金を用いた補修は，母材に対し強度が低く，延性が大きな材料を用いて肉盛を行う手法であり，肉盛溶接時に発生したひずみを肉盛層にて優先的に緩和し溶接割れを抑制する[8]。

溶接部近傍の予熱を行う手法は約1200K以上に予熱を行うことで，溶接部と溶接部近傍温度勾配を和らげ，かつ γ' の析出によって最も靭性が少なくなる温度域を避けることで溶接割れの発生を抑制している[9],[10]。

Ni基超合金は一般にGas Tungsten Arc welding（GTAW）により補修されているが，GTAWに対し，よりエネルギー密度を高めることができるPlasma Transferred Arc Welding（PTAW）やレーザ溶接法も採用されている。これらの肉盛方法は，エネルギー密度が高く，その結果，溶接入熱の総量を低く抑えることができ，残留応力の低減が可能となる[11]。

しかしながら①の固溶強化型Ni基超合金を用いた例では最も一般的に使用されているIN625の高温での引張り強度はGTD-111の25%しかなく，強度が要求される箇所には適用ができない[8]，またガスタービンの燃焼雰囲気温度によっては酸化特性も問題となると考えられる。

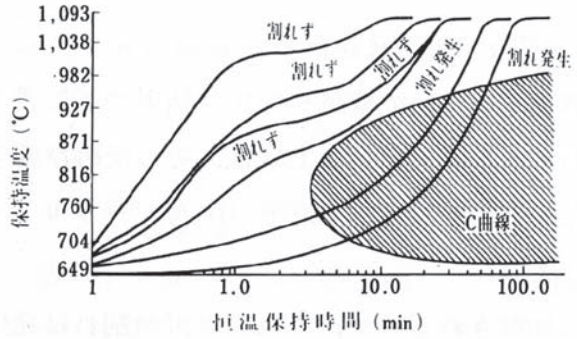


図４　Rene 41における再熱割れの発生に及ぼす加熱速度の影響[1]

表２　Ni基超合金の再熱割れの原因とその対策[1]

原因	対策
（1）母材の割れ感受性大	（1）母材の化学組成の検討
（2）過大残留応力	（2）a）収縮ひずみが最小になるような溶接方法の採用 b）不必要な拘束を与えない c）溶体化熱処理前に溶接金属をピーニングする
（3）不適当な熱処理	（3）溶体化熱処理温度までの加熱速度を増す

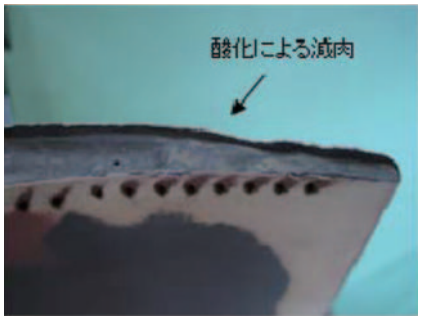
Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

また②の1200K以上に加熱しつつGTAWなどで肉盛行う場合は，酸化についての注意や，輻射熱などの対策のための保護具，高温部に触れないように注意しつつ肉盛を行わなければいけないなどのハンドリングの点での課題も考えられた。

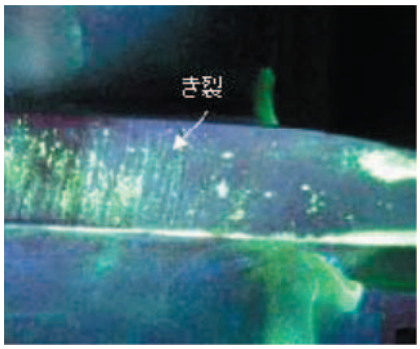
このため低入熱肉盛法による予熱なしの補修法の検討を行った。

3．翼先端部とプラットホーム部の損傷

図５に現用ガスタービン動翼の運転後の状態を示す。図中矢印で示すように先端部では酸化により肉厚の減少が見られるほか，プラットホーム部にはき裂の発生が認められる。



（a）翼先端部



（b）プラットホーム部（蛍光浸透探傷）

図５　実機翼に見られる損傷

4．翼先端部のレーザ肉盛補修

翼先端部の補修技術開発に用いた装置外観を図６に示す。発振器は2kWのディスクレーザを使用し，溶接ヘッドは６軸のロボットに持たせた。翼および試験片は雰囲気置換用チャンバーの中におき，アルゴン雰囲気で肉盛を行った。レーザ出力は，材料の希釈が最も少なく，かつ融合不良がおきない条件として400Wを選定した。

肉盛粉末は翼基材と同等材とし粉末供給速度は2.5g/min，肉盛速度は150mm/minとした。粉末肉盛溶接には，粉末を側方から供給するタイプと同軸で供給するタイプの２種の方式があるが，翼先端部の補修では，同軸型の溶接ヘッドを使用した。同軸型の溶接ヘッドのヘッド構造の模式図[12]を図７に示す。

図６　翼先端部の補修試験に用いた装置外観

同軸型の溶接ヘッドでは原料粉末をアルゴンガスと共にレーザ焦点部近傍に同軸で供給し，粉末を溶融することで肉盛を行う。

今回の肉盛材料については事前試験にてレーザ肉盛のみでは，肉盛量の増加に伴って溶体化熱処理中に割れが発生することが明らかとなったため，表２の再熱割れ対策を行った。

なおここでは溶込み量を最低限に抑えており，これ以上の入熱の低減は困難であることから，１）溶体化熱処理時の昇温速度向上，２）溶体化熱処理前のピーニングについて検討した。

図８に合金状態図計算ソフト（J-MatPro）で計算した動翼基材のTTT図を示す。本計算によれば1100K以上でγ’相が10%析出するのに必要な時間は120秒以下となった。ガスタービン翼の寸法，熱容量を考慮すると，大型の真空炉を用いた熱処理ではγ’相の析出なしに加熱することは困難と考えられた。このため，熱処理による残留応力低減ではなくピーニングによる残留応力の低減手法を主に検討することとした。

まずピーニングの効果を実翼の補修部と同一厚さ，同

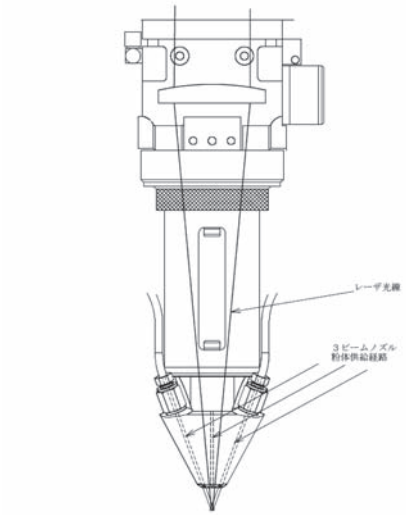


図７　粉末肉盛装置ヘッド模式図[12]

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

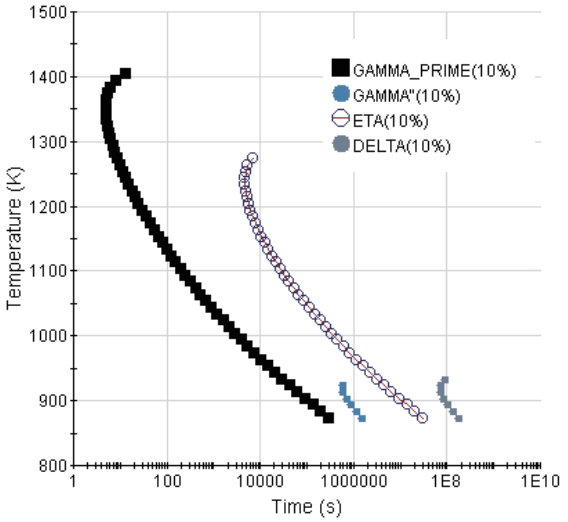


図８　ガスタービン動翼材の計算によって得られたTTT図

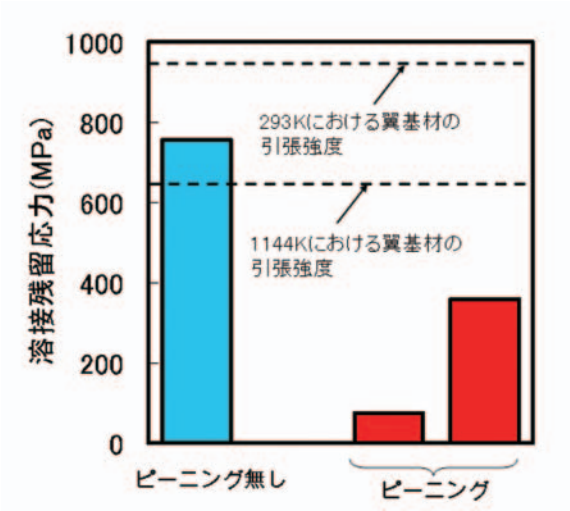


図９　残留応力の測定結果

一高さ，同一溶接長さとなるようにピーニングを行いつつ肉盛を行った試験片（以降，ピーニング材と示す）とピーニングを行わずに肉盛を実施した試験片（以降，ピーニング無し材と示す）を作製し，その溶接残留応力を測定することで評価した。溶接残留応力は肉盛部中央にひずみゲージを添付し切断法にて測定した。

次に実機翼材を用いてピーニング材とピーニング無し材を作製し，溶体化熱処理後の肉盛部表面を顕微鏡で観察し溶接割れの有無を確認した。

図９に溶接残留応力の測定結果を示す。

ピーニング材の残留応力は，ピーニング無し材に対し，1/2以下となった。また翼材の強度と比較ではピーニング無し材の残留応力は室温の引張強度以下であるものの1144Kの引張り強度[13]以上の値となっていた。

図10にピーニング材とピーニング無し材の溶体化熱処理後の試験片外観を示す。ピーニング無し材は全周にわたって割れの発生が認められたが，ピーニング無し材では割れは１箇所のみとなっていた。これより再熱割れの抑制にピーニングは効果があることが確認できた。

図11にピーニング材の溶接部全周の合金組織を示す。溶接部全周に渡って溶接割れなどの欠陥は認められなかった。また肉盛／基材界面についても溶接割れやピーニングにより導入された応力による再結晶も認められず健全な組織を呈していた。

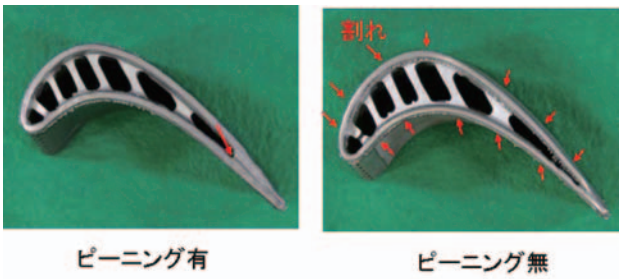


図10　ピーニング材とピーニング無し材の溶体化熱処理後の肉盛部外観

5．プラットホーム部のレーザ肉盛補修

プラットホーム部に発生したき裂の補修に対してもレーザ粉体肉盛法を検討した。レーザはYAGレーザを使用した。なおプラットホームの補修にはビームの前方に溶接粉末を供給する方法を採用し，ピーニング処理は行っていない。

溶接欠陥は溶接部始終端にて生じやすいが，始終端処理を工夫することで，溶接欠陥の発生を抑制した。図12に肉盛溶接材の表面観察結果，図13にその断面組織を示す。溶接金属中および溶接金属／基材界面に溶接欠陥は認められず，また溶接金属部も均一な組織を得る事ができた。

6．まとめ

ガスタービン動翼材に使用される析出強化型Ni基超合金の補修時に発生する溶接欠陥の種類と補修方法をまとめるとともに，当社で開発を行っている下記技術を紹介した。

1）Ni基超合金の溶接中／溶体化熱処理中に発生する再熱割れ対策としてレーザ粉体肉盛溶接にピーニング処理を組み合わせた補修技術を開発し，ガスタービン翼先端部の肉盛補修への適用を検討した。ピーニングを行わないものに対し，ピーニングを組み合わせることで溶接時の残留応力は1/2以下となり，溶体化熱処理後の再熱割れの発生を大幅に低減することができた。

2）ガスタービン翼プラットホーム部の補修についてレーザ粉体肉盛溶接を採用し，かつ溶接部始終端処理を工夫することで欠陥なく補修する技術を開発することができた。

本論文掲載の商品の名称は，それぞれ各社の商標として使用している場合があります。

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

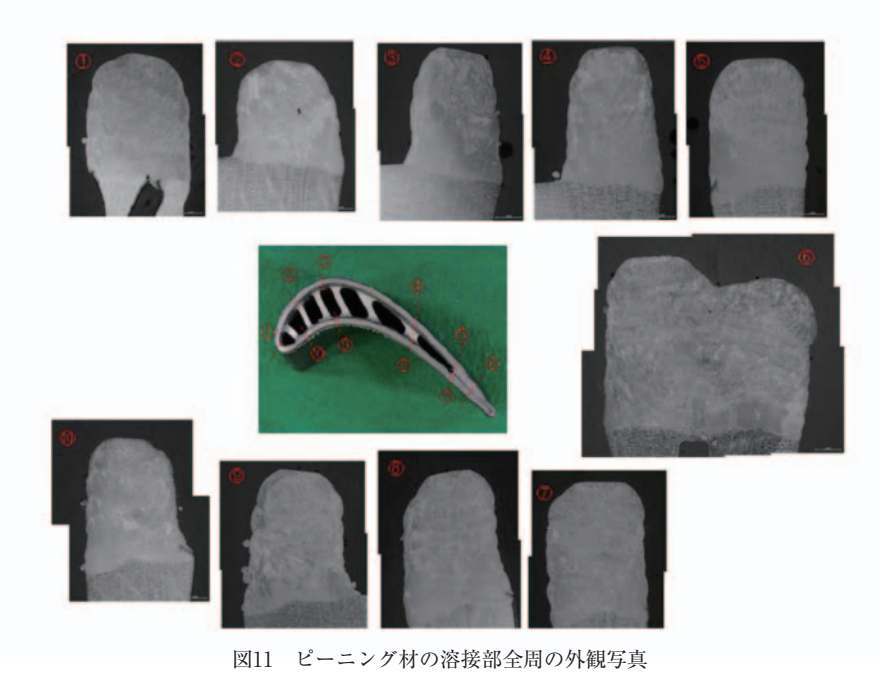


図11　ピーニング材の溶接部全周の外観写真

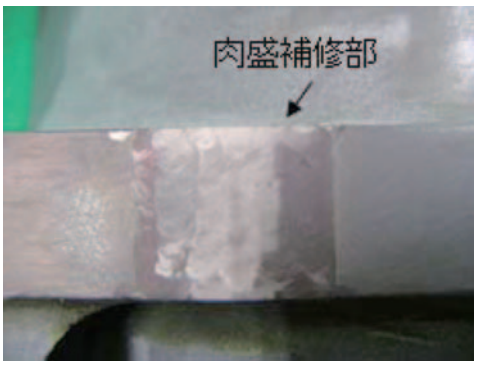


図12　プラットホーム肉盛補修部の外観

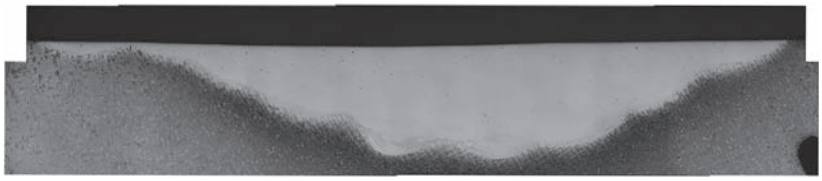


図13　プラットホーム部の肉盛部断面組織

7．参考文献

(1) 井川博，五大友和，耐熱鋼・耐熱材料の溶接，1978, p174 ～ p184，産報出版

(2) Matthew J.Donachie, Stephen J.Donachie, Superalloys A Technical Guide Second Edition, 2002, p154, ASM International

(3) Keith A.Ellison, Joseph Librudi and Jan T. Stover, Proc of 8th International symposium on superalloys,1996, p764

(4) J..Zou,H.P.Wang,R.Doherty and E.M.Perry Proc of 8th International symposium on superalloys,1992, p166

(5) Stephen J. Balsone, The Gas Turbine Handbook. US Department, 2006, p411 Office of Fossil Energy National Energy Technology Laboratory

(6) W.S.Walston,K.S.O' hara,E.W.Ross,T.M.Pollock and W.H. Murphy , Proc of 8th International symposium on superalloys,1996, p28

(7) Chester T. Sims and William C.Hagel, Superalloy, 1972, p527, John Wiley & Sons,inc

(8) David W Gandy, Gregory J Frederick, Arte J Peterson, J.T. Stover and R.Vishwanathan, Proc of Fourth International EPRI conference welding and repair Technology for power Plant, 2000

(9) Jen, M. S. Hsu, S. Nico, M. Foster, and Z. Sinnott, Proc. of Fourth RRAC International Welding and Repair Technology for Power Plants Conference, 2000, 7GT.

(10) 特表2003-533354ほか

(11) David. W. Gandy , Gregory J Frederick, J.T. Stover and R. Viswanathan, ASM international materials solutions conference 2000

(12) 愛知産業株式会社殿提供

(13) R. Viswanathan , Gas Turbine Blade Superalloy Material Property Handbook,2001,17-1 ～ 17-8

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

特集：最新のガスタービンにおける修理・補修技術

日立のガスタービン予防保全技術

市川　国弘[*1]　ICHIKAWA Kunihiro
関原　傑[*2]　SEKIHARA Masaru
今野　晋也[*2]　IMANO Shinya

キーワード：ガスタービン，予防保全，寿命評価，再生処理

1．はじめに

電力の自由化と規制緩和によるグローバルな競争激化により，電力会社やIPP（Independent Power Producer）など新規参入電力事業者では，競争で優位に立つために，ライフサイクルコスト削減のニーズがある。さらに経済性と信頼性を両立させるために，稼働率向上に対する要求も大きくなっている。このような背景から，コンバインド発電設備の主機であるガスタービンには高効率化が要求され，タービン入口ガス温度は年々急速に上昇してきている。これに伴い高温部品である燃焼器や動静翼の負荷条件は益々苛酷になっている。したがって，ガスタービンを高い信頼性で運転するためには，これらの高温部材の損傷を的確に把握して設備の保全管理をする必要がある。

ここでは，ガスタービンの信頼性向上と長寿命化の観点から，高温部品の保守管理，余寿命診断技術，補修・長寿命化技術，および最新の損傷評価技術について述べる。

2．高温部品の保守管理

2.1　高温部品の損傷形態

ガスタービンにおいて，予防保全が特に重要となる高温部品の経年劣化事象を，日立製作所H25ガスタービン（25MW級）の構造断面図と併せて図１に示す。高温部品は，その使用環境により高温高圧下での酸化・腐食損傷，クリープ損傷，起動停止の低サイクル疲労損傷，振動による高サイクル疲労損傷等，様々な経年劣化の様相を示す。これらの劣化形態，進行状況は，定期検査または燃焼器点検の際に詳細に把握する必要がある。点検結果は所定の判定基準に従って評価し，ガスタービンの運用に支障をきたさないように部品の取替え・補修等の適切な予防保全措置を講じている。

また，点検データ蓄積による損傷傾向監視は，事象の原因やメカニズム解明の一助となり，部品寿命推定や耐力向上策の指針として重要な役割を果す。

原稿受付　2012年５月29日
＊１　㈱日立製作所　日立事業所
〒317-8511　日立市幸町３－１－１
＊２　㈱日立製作所　日立研究所

2.2　高温部品の寿命管理

高温部品の寿命は，クリープ・摩耗・酸化等の運転時間に依存する損傷と低サイクル疲労のように起動回数に依存する損傷の両者によって消費される。したがって，高温部品の寿命（点検・補修間隔）は，運転時間と起動回数の両方を加味する必要があり，大きく二つの管理手法が適用されている。一つは，運転時間と起動回数の両方に制限値を設けて個々に管理する手法，もう一つは起動回数による寿命消費を運転時間に換算し，全て運転時間ベースで管理する手法である。

後者は，等価運転時間管理と呼ばれる手法であり，その概要を図２に示す。等価運転時間は，下式により算出する。下式は，クリープ・疲労相互作用下の寿命評価式として幅広く用いられている線形累積損傷則を基にしている。

$$L = H + A \times [N + \Sigma (B \times S)]$$

L：等価運転時間
H：実運転時間
N：起動回数
S：負荷変化回数
A：起動回数に対する換算係数
B：負荷変化回数に対する換算係数

ここで，起動停止１回当たりの寿命消費時間を寿命換算係数Aと称しており，起動回数Nに換算係数Aを乗じた時間と実運転時間Hを加算して等価運転時間Lを算出している。

また，負荷変化（トリップ，ランバック）回数も換算係数Bを乗じて起動回数へ換算し，寿命消費時間に加算している。等価運転時間Lが，所定の寿命時間に到達した時点で当該部品は消耗したことになる。高温部品の寿命は，各プラントの運転条件・環境条件によって影響するため，実機の損傷実績を踏まえて随時見直しを実施し，各プラントの運用に即した管理値に近づけている。

2.3　高温部品の運用計画

高温部品の運用計画は，前節で示した管理寿命に基づき立案されるが，高温部品の多くは寿命の途中でクラック・変形・摩耗等の損傷部位を補修しながら運用する部品である。高温部品はNi基やCo基の超耐熱合金が用い

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

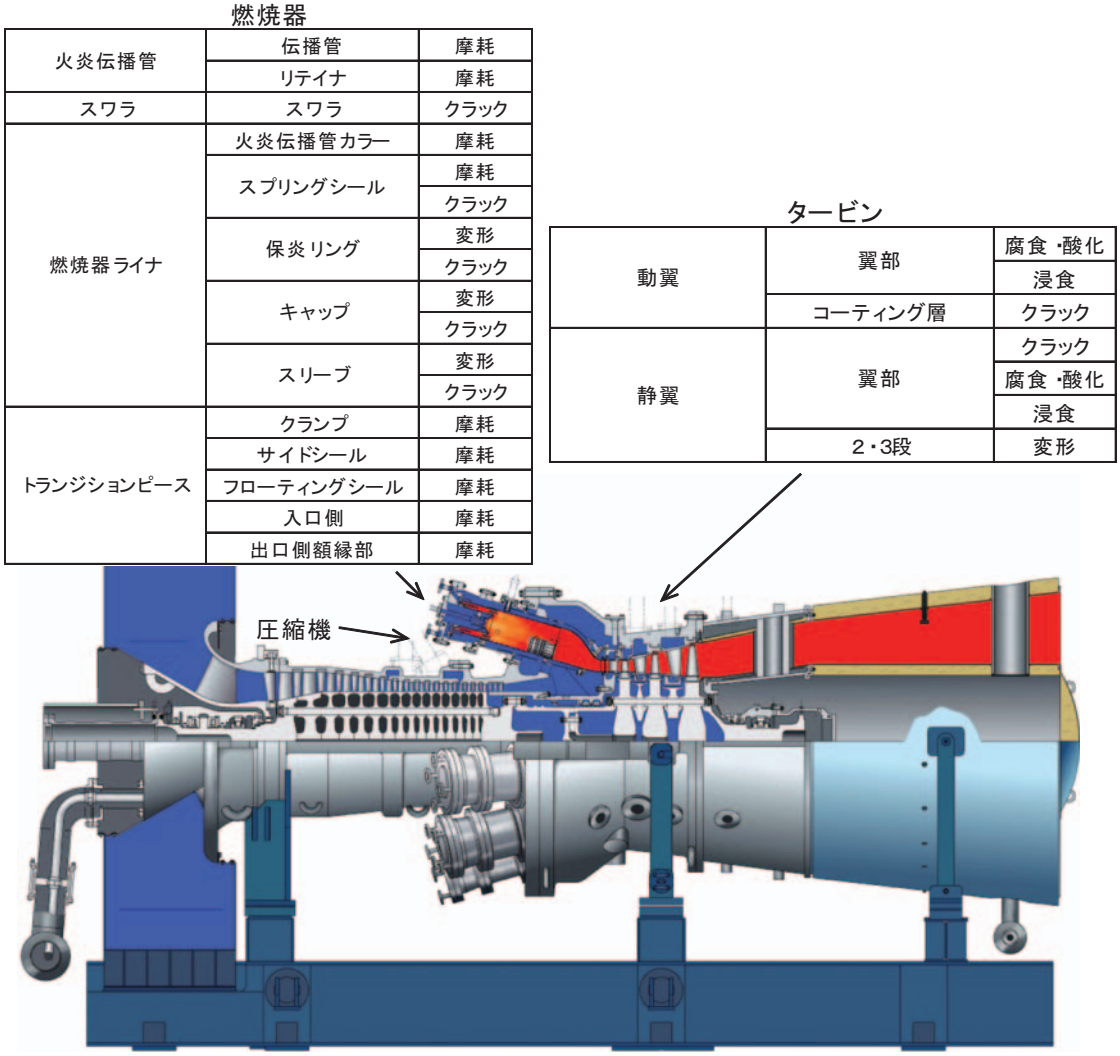


図１　ガスタービン高温部品の経年劣化損傷例

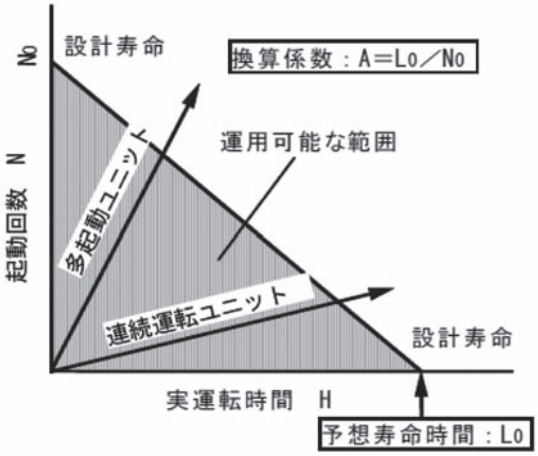


図２　高温部品寿命管理の概念

られており，特殊な補修（４章参照）を要することから，その大半は専門の工場で補修しており補修工期も比較的長い。このため事前に定期点検で補修対象となる部品を予測し，その代品（新品または補修完成品）を準備しておく必要がある。これらを一般に，部品ローテーションと称している。高温部品は，プラントの軸数，定期検査時期，部品寿命，補修時期，補修工期等を鑑みてローテーション計画を立案し，これに基づき運用されている。

特に最適ローテーションの策定は一見単純そうに思えるものの，かなりの労力を要することから，最適な部品ローテーションが短時間で得られる，部品ローテーションシステムを構築している。このシステムでは，前述の部品ローテーションに係わる定期検査時期等の必要データを入力し，部品数最小化等の目的に応じた最適条件を設定することにより，最適ローテーションが自動的に得られるものである。

３．余寿命診断技術

3.1　余寿命診断の概念

高温部品の構成材料には特殊なNi基やCo基の耐熱超合金が用いられている。また構造上も複雑な冷却構造が採用されている部品が多い。このため，高温部品の価格は決して安価ではなく，使用環境の苛酷化からその交換頻度も高い。このような背景から，余寿命診断の殆どは部品の延命化を目的に行われる。余寿命診断の概念を図３に示す。余寿命診断は実際に予想寿命まで運用した部

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

品を対象に行われることが多い。ここでは，予想寿命到達品が今後更に運用可能な実運転時間と起動回数を各種手法にて推定し，延命化可能な範囲を提供している。この診断結果とプラントの点検時期を踏まえて，予想寿命到達品の継続使用可否を判断する。

余寿命診断手法は図3中に示すように(1)～(4)の４つに分類される。(1)運転来歴による寿命消費評価は，実運転時間や起動回数等の使用来歴から線形損傷則等の寿命消費則に則り推定する手法。(2)定検時の損傷傾向管理評価は，クラック・減肉・変形等の進展傾向から推定する手法。(3)検査による非破壊評価は，実機の損傷部からレプリカを採取し，微小き裂や組織を観察する手法。(4)サンプル採取による破壊評価は，実機の損傷部からミニチュア試験片を採取し，クリープや引張強度等の機械的強度を測定する手法。高温部品の余寿命はこれらの診断結果とその部品の特徴（クラックを許容できる部品か否か，補修可能な部品であるか否か等）を踏まえて，総合的に評価する必要がある。

以下，各部品の余寿命診断技術の一例について紹介する。

3.2　動翼のコーティング劣化診断

動翼は回転体の一部であり，高い信頼性確保のため，一般的には母材のき裂は許容されていない。このため動翼では耐食コーティングのき裂発生抵抗評価が重要である。このき裂発生抵抗を評価する方法として，スモールパンチ（SP）法を用いている。SP法の概要を図4に示す。SP法は，実翼から直接採取した10mm角で厚さ0.5mmの薄肉試験片を用い，硬球を中央に押し当ててその荷重―変位曲線から破壊エネルギを求める手法である。

動翼コーティング層の厚さは200～300μmと薄いため，SP法が好適である。室温から高温までのSP試験を行い種々のコーティング材の延性脆性遷移温度（DBTT）を求めた。このDBTTの上昇がき裂発生抵抗に対応している。

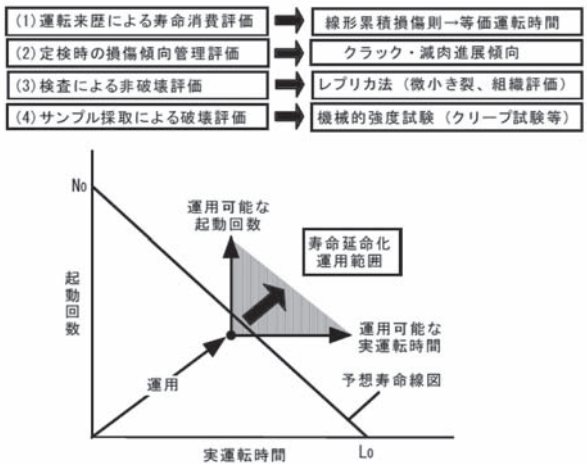


図３　余寿命診断の概念

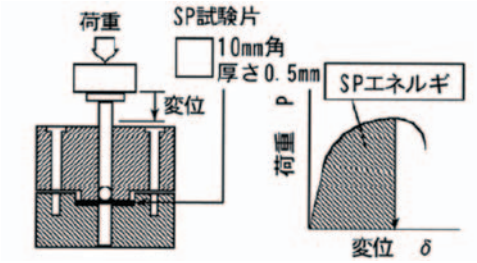


図４　SP試験の概要

このDBTTと室温でのSP破断延性との関係を求めた結果を図５に示す。室温でのSP試験結果から長期使用されたコーティング材のDBTTが評価でき，これにより動翼コーティングの劣化を診断できる。

3.3　TBCはく離損傷評価

タービン翼の冷却強化の手法の一つとして，熱伝導率の低いセラミック皮膜を動翼表面に施工することで，内部冷却翼の温度を低減する熱遮蔽コーティング（TBC, Thermal Barrier Coatings）の適用が主流となりつつある。TBCはすでに運用中の翼に施工することも可能であり，耐食耐酸化性向上も期待できることから，その適用範囲は今後さらに拡大することが予想される。実機環境下でのTBCはく離寿命評価手法の開発を目的として，変動温度条件下でのひずみ制御による試験を行い検討してきた[1]。はく離進展挙動へ及ぼすセラミック層の厚さの影響を図６に示す。長さ20mmに達するはく離寿命は厚さ0.9mmが最も短く，３mm程度まで進展したはく離は急激に進展する傾向にあった。一方で厚さ0.3mmと0.6mmはほぼ同様のはく離進展挙動を示した。冷却向上の観点からは，より厚い0.6mmのセラミック層厚さの方が望ましいことから，遮熱性と信頼性を両立できるTBCの施工が期待できる。

3.4　EBSP法を用いた損傷評価

高精度な新しい材料損傷評価方法として，近年EBSP法（Electron Back-Scattering diffraction Pattern：電子後方散乱図形）を用いた手法の研究開発が行われている[2]。EBSP 法は電子線回折パターンを解析することによって，材料の結晶方位や結晶構造を同定する用途で利用されている。塑性変形した材料中では，転位が蓄積されて結晶方位に変化が生じるため，これを測定することによって，材料の変形を評価することが可能である。

測定例として，図７にNi基合金クリープ模擬損傷材（クリープ試験中断材）について，EBSP分析した結果を示す[2]。

図７（a）は，模擬損傷材断面の結晶方位差関数を表示した例で，暖色の部分ほど結晶方位差が大きいことを示している。図中の矢印で示すように，粒界付近に析出した炭化物の周辺で方位差が生じていることが分かる。図７（b）には，種々の温度，時間でクリープ試験を中

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

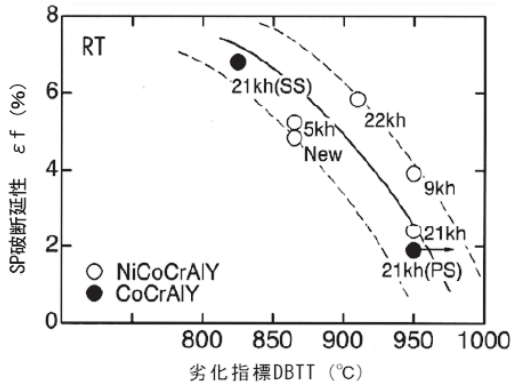


図５　動翼コーティングのSP試験結果

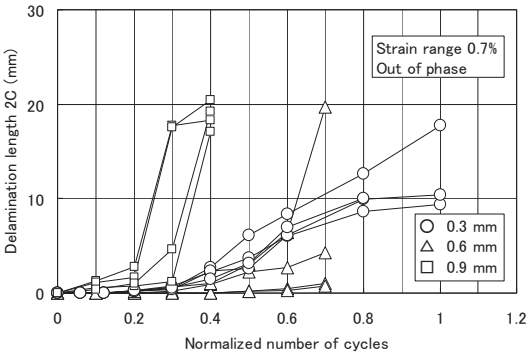


図６　セラミック膜厚の影響（新材結果で無次元化）

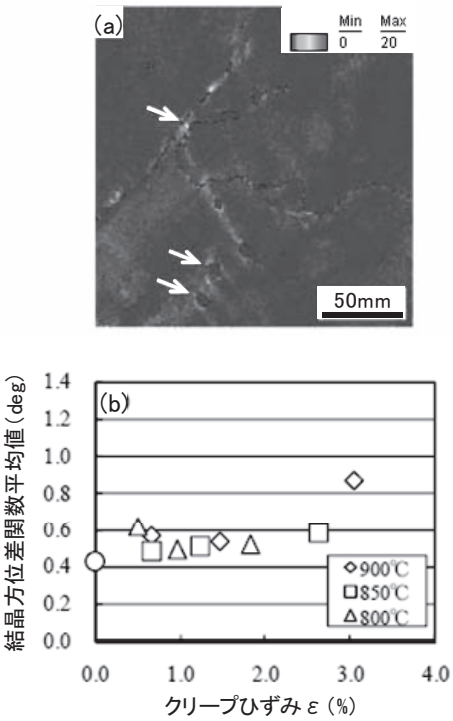


図７　Ni基合金クリープ模擬損傷材のEBSP分析例（a）結晶方位差関数マップ，（b）クリープひずみと結晶方位差関数平均値の関係

断した試験片からEBSP分析で得られた，クリープひずみと方位差関数平均値との関係を示す。両者は，試験温度によらず良い相関を示している。

EBSP 法による損傷評価は未だ研究段階であるが，従来法では検出が難しい，局所的変形や初期損傷等を高精度で定量的に評価できる可能性を有している。

また，クリープ損傷の他にも，疲労損傷，クリープ疲労損傷等の評価にも有望であることが分かってきており，将来有望な評価法として研究開発が進められている。

４．補修・長寿命化技術

ガスタービンの長期運転の実績と定検データの蓄積により，各設備の運用に応じた損傷・劣化形態が明らかになりつつある。

高温部品の長寿命化は，余寿命診断等の損傷評価技術の高精度化（部品の限界使用），損傷部位の耐力向上（材質変更・表面改質・構造変更），補修再生技術の確立により実現される。ここでは，タービン動静翼の最新補修再生技術，および最新の損傷評価技術について述べる。

4.1　動翼の補修再生技術

実機使用した第１段動翼の外観状況の一例を図８に示す。ガスタービン動翼は高温高圧の燃焼ガス中において，遠心力及び高負荷熱応力を受ける過酷な部品であることから，Ni基合金が用いられ，翼表面には耐食（耐酸化）コーティングを施し，母材を保護している。ところが，翼の長時間使用に伴いコーティングの劣化損傷が進行すると母材の保護機能が損なわれ，母材の酸化減肉等の損傷が進行し翼の寿命を低下させる要因となる。このため，コーティングの劣化が小さく母材の損傷が進行する以前に旧コーティングを剥がして新コーティングを再度施工する再コーティング補修が必要となる。動翼再コーティング補修の概要を図９に示す。ここでの再コーティングは，より耐久性，耐食性の高い膜質が得られる減圧プラズマ溶射にて施工している。本補修による動翼の長寿命化には，コーティング／母材表面の劣化状況に即した補修時期の見極めが重要である。

燃焼温度の高いガスタービンでは，第１段動翼の先端が高温酸化で減肉する場合もある。従来，Ti，Al含有量の大きいNi基合金は，溶接入熱による高温割れが懸念

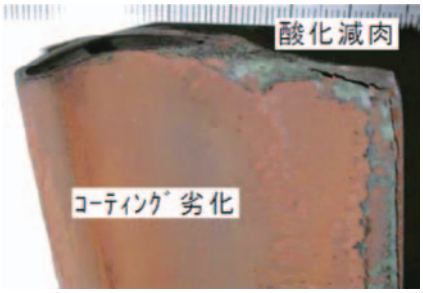


図８　実機使用動翼の外観状況例

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

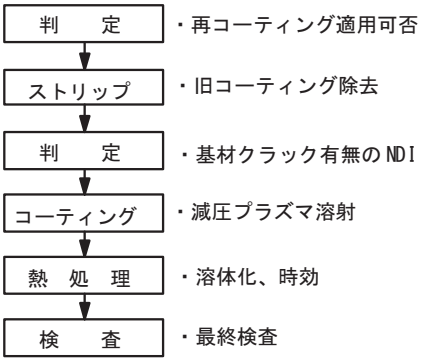


図９　動翼再コーティング補修の概要

され難溶接材とされていたが，近年の低電流溶接電源の開発により，遠心力の小さい翼先端部に限っては可能になっている。また，動翼材はγ'相で強化されたNi基合金であり，高温下での長時間使用によりγ'相が粗大化してクリープ強度等が低下する。この組織・強度劣化を再生する手法として，再生熱処理とHIP（Hot Isostatic Pressing：熱間等方加圧）処理の２種類が提案されている[3]。再生処理による組織回復メカニズムを模式的に図10に示す。再生処理の有効性を検証するため，累計運転時間40,256時間，累計起動停止回数1,327回の使用履歴を有する実機使用翼に対して，再生処理を行った。ここでは，燃焼ガスに曝されず温度の低いシャンク部を新翼相当材として評価を行った。翼表層部の延性を把握するため，スモールパンチ（SP）試験を実施した。その試験結果を図11に示す。未処理翼のSP破断延性は，シャンク部と比較し，低下していることがわかる。これに対し，再生処理翼については，シャンク部と同等以上の値を示していることがわかる。すなわち，再生処理により翼表面の延性が回復することが認められた。遠心力によるクリープ損傷を把握するため，クリープ試験を実施した。その結果を図12に示す。新材と同等と考えられる

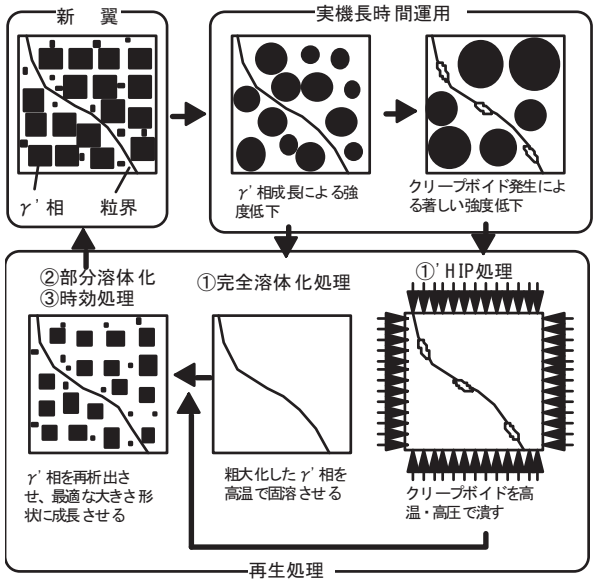


図10　再生処理による組織回復メカニズムの模式図

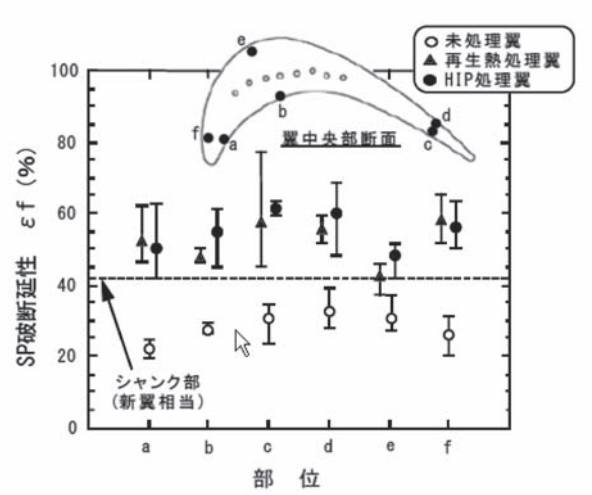


図11　動翼再生処理前後のSP延性比較

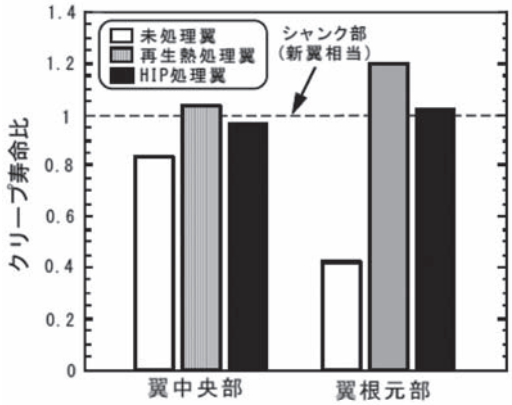


図12　動翼再生処理前後のクリープ寿命比較

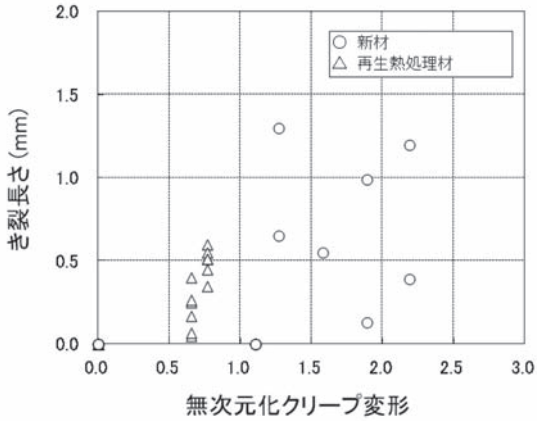


図13　クリープ変形とき裂長さの関係（初期変形で無次元化）

シャンク部に比べ，未処理翼はクリープ寿命が低下している。一方，再生処理を行った翼では，各部位ともシャンク部と同等のクリープ寿命に回復していることが確認できた[3]。

今回，再生処理に使用した実機使用翼にはクリープボイドが認められず，再生熱処理とHIP処理では，その回復効果に差異がほとんど認められなかった。動翼は回転体であり，クリープボイドが発生する以前に再生処理を

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

施す必要がある。ここでの処理は，費用的に安価でHIP処理と同等の改善効果が得られる再生熱処理が有効であると考える。

4.2 再生熱処理による曲げクリープ損傷回復

一般に，再生熱処理の効果の検証は単軸の引張クリープ試験などにより行われている。しかしながら，ガスタービンの部品などには曲げ負荷が作用する構造も採用されることから，曲げ負荷下でのクリープき裂の発生挙動と再生熱処理の効果についても検討を行っている[4]。曲げクリープ試験片のクリープ変形量とき裂長さの関係を図13に示す。図より再生熱処理を施工しない新材のき裂発生時点におけるクリープ変形量は，再生熱処理材のき裂発生時点におけるクリープ変形量の約２倍程度であることが明らかとなった。以上のき裂発生および異常組織に対するクリープ変形量の限界値を考慮した補修計画を立案することにより信頼性の高い保守を行うことが可能となる。

6．おわりに

ガスタービンの信頼性向上と長寿命化の観点から，高温部品の保守管理，余寿命診断技術，補修・長寿命化技術，損傷評価技術について述べた。今後も高効率，経済性，信頼性の面でより最適に運用するため，ユーザとメーカの相互協力により進めていくことが必要であると考える。

参考文献

(1) 吉竹茂，飯尾哲史，船尾淳喜，関原傑，有川秀行，市川国弘，“熱機械疲労下における熱遮蔽コーティングのはく離挙動”，材料Vol.58，No.9，pp.759 ～ 766（2009-10）.

(2) 渡辺 肇，楠元 淳一，金谷 章宏，佐藤 順，今野 晋也，市川 国弘，“EBSP 法を用いた高温材料の損傷評価”，日本機械学会論文集（B 編），77巻，776号，pp. 949 ～ 954（2011-4）

(3) 吉開秀樹，小川智，永江正隆，金谷章宏，今野晋也，土井裕之，関原傑，市川国弘，“ガスタービン動翼の再生処理について”，火力原子力発電大会研究発表要旨集 PP.28 ～ 29（2004）.

(4) 関原傑，市川国弘，今野晋也，鍵谷幸生，伊藤明洋，中條幸司，“再生熱処理によるNI基超合金の曲げ荷重下でのクリープ損傷回復”，材料 Vol.60，No.3，pp.202 ～ 209（2011-3）.

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

特集：最新のガスタービンにおける修理・補修技術

ガスタービンの保守技術

澤　徹*1
SAWA Tetsu

酒井　義明*1
SAKAI Yoshiaki

キーワード：ガスタービン，高温部品，補修技術，寿命延伸技術

1．はじめに

ガスタービンを蒸気タービンと組み合わせたコンバインドサイクル発電設備は，二酸化炭素排出量の削減，エネルギー資源の高効率利用という市場要求に対応し，電力供給の主役となっている。また，近年では，電源の確保という観点より，高効率ガスタービンを用いたシンプルサイクル発電設備も多く導入されている。これらの主機であるガスタービンは，高温燃焼ガスを作動流体としていることより，燃焼器や動静翼などの構成部品は，高い熱応力や遠心力が作用する過酷な環境に晒され，運転時間の経過に伴い，劣化・損傷が進行し，寿命が消費される。これらの部品は高価であるため，定期的な補修と交換を繰り返しながら運用されていくが，できる限り長時間使用していくことが，メンテナンス費削減への効果が大きく，交換インターバル延長につながる補修技術や，寿命再生，長寿命化という寿命延伸技術の開発が求められている。ここでは，これらの技術開発状況について紹介する。

2．高温部品の損傷状況

ガスタービンの高温部品は厳しい環境で使用されるため，図１に示すように発生する劣化・損傷形態はさまざまである[1]。

2.1　燃焼器における損傷

燃焼火炎からの部品保護のため燃焼器には冷却対策が施されているが，乾式低NOx燃焼器には様々な燃焼モードがあり，短時間ではあるが火炎の偏りや部分的な冷却不足による局所的なホットスポットが生じることがある。このため，局所的な材料劣化や変形が現れる。

燃焼器ライナにおける典型的な損傷形態は,混合空気孔とライナ本体との接合部のような溶接部におけるき裂，スプリングシール部・ライナストップ部等の他部品との取合部における摩耗及び材料劣化･変形である。ま

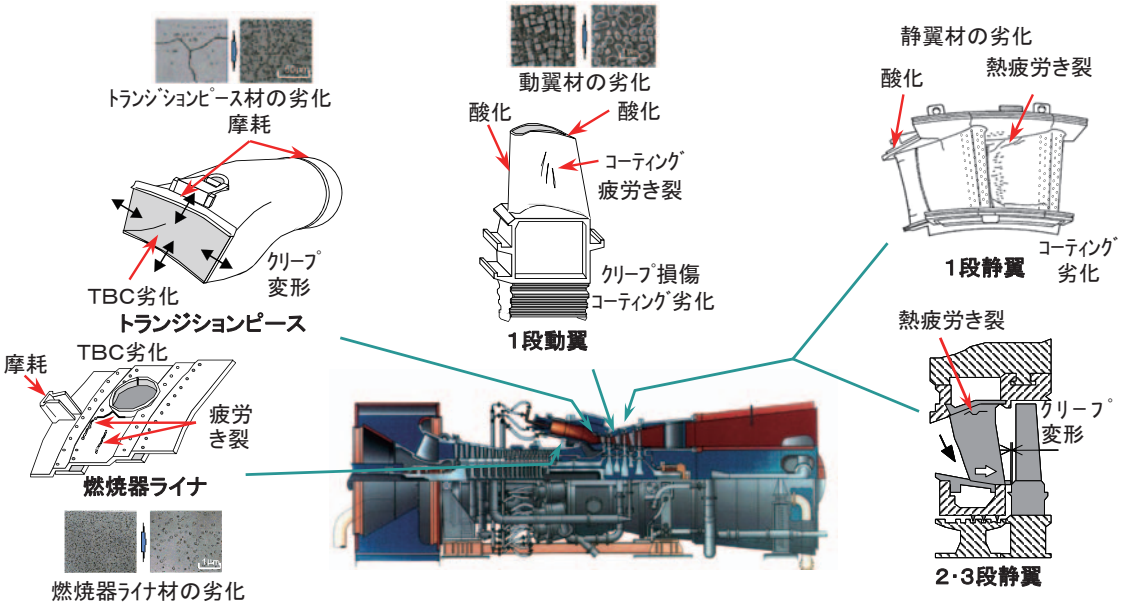


図１　ガスタービン高温部品の主な劣化・損傷事例

原稿受付　2012年５月20日
＊１　㈱東芝　電力システム社　火力・水力事業部
火力改良保全技術部
〒230-0045　横浜市鶴見区末広町２－４

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

た，燃焼器ライナとタービン第1段静翼の間に取り付けられているトランジションピースでは，材料劣化とクリープ変形が発生し，前部サポート・ピクチャフレーム等の他部品との取合部では摩耗も発生する。燃焼器ライナ・トランジションピースには遮熱コーティング（TBC:Thermal Barrier Coating）が施工されているが，これらも劣化し，はく離やSpallingが発生する。

2.2　タービン静翼における損傷

第１段静翼は，燃焼器と同様に厳しい温度条件で使用されるため，損傷が顕著に現れる部品である。起動/停止により熱疲労き裂が発生し，そのき裂は起動回数・運転時間の増加に伴い増大する。局所的な高温酸化減肉も側壁部で観察され，その程度・領域はタービン入口温度の上昇に伴い拡大する傾向にある。なお，1300℃級ガスタービンの第１段静翼にはフィルム冷却を多用しているが，その冷却孔には多数のき裂が発生する。

一方，下流段の第２段・第３段静翼においてもき裂が観察されるが，その発生頻度や程度は僅かである。主要な損傷は，経年的に発生するクリープ変形である。このクリープ変形は，場合によってはロータとの接触事故を引き起こす可能性があるため，定期的な傾向管理を行い，適正な時期に修正加工する必要がある。

2.3　タービン動翼における損傷

タービン動翼には運転中高い遠心力と熱応力が作用し，高温部品中で最も厳しい環境で使用される。そのため，動翼の主要な損傷は，クリープ損傷・熱疲労・高温酸化による減肉・腐食等である。第1段動翼は，短翼であり，冷却が施されることより，翼基材の劣化は比較的穏やかである。しかし，高い熱応力が発生するために，コーティングの劣化と共に熱疲労によりコーティングのき裂が発生する。また，1100℃級に比べ1300℃級ガスタービンにおける第１段動翼の高温酸化は厳しく，局所的に強度の酸化減肉が発生する例もある。従って，翼外表面及び冷却空気通路内面に施工される耐酸化コーティングは翼交換寿命に影響を与える重要な要素である。図２にコーティングの劣化と動翼基材劣化の関係を示す。この耐酸化コーティングは高温酸化や高温腐食から基材を保護するのみでなく，翼基材の劣化低減に大きく寄与している。

一方，長翼である下流段の動翼の主な損傷はクリープ損傷であり，経年的に翼材料の劣化が進行する。

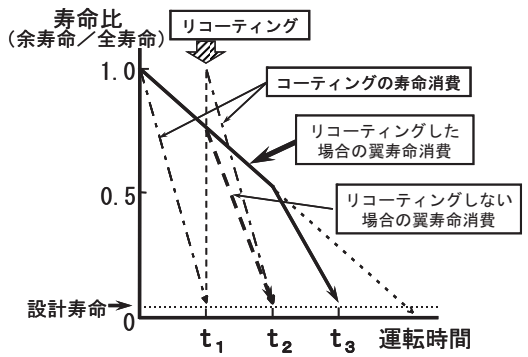


図２　コーティング劣化と動翼基材劣化の関係

３．高温部品の寿命と補修/交換インターバル

図３に，高温部品の寿命と補修との関係を示す。図に示すように，点検時期と高温部品寿命はクリープ・高温酸化・磨耗等の運転時間要因や疲労等の起動回数要因により規定される。管理基準はメーカーにより異なり，実運転時間，実起動回数にて管理されるものと，起動回数を運転時間に置き換える等価運転時間にて管理されるものがある。実運転時間，実起動回数管理機では，ピーク運用の場合には起動回数基準が適用され，定格負荷運用の場合は運転時間基準が使用される。

一方，補修は各点検時期に補修基準に則り実施される。部品の交換時期は，各点検時期に実施される補修費用と部品交換費用との経済性評価にて決定される[1]。

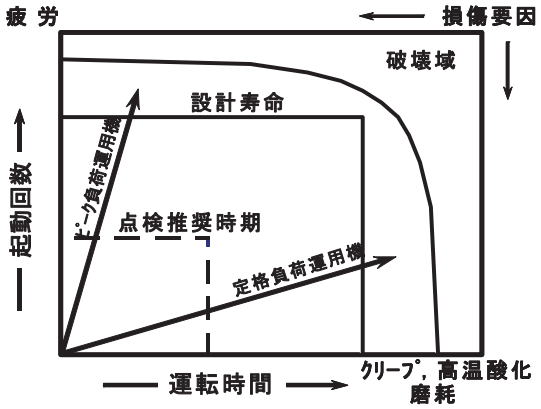


図３　高温部品寿命と補修/交換インターバルの概念[2]

４．最新補修技術・寿命延伸技術

上述のようにガスタービンの高温部品は非常に厳しい環境で使用されるため,その劣化損傷は避けられず，様々な損傷が発生する。そのため，静翼や燃焼器は一般的にTIG溶接等により補修を施し，再使用される。一方，動翼では経年的な材料劣化と共に高温酸化や外来飛来物による損傷が発生するが，動翼の使用材料は硬く，さらに，難溶接材であるため，従来は特別な補修技術はなく，単にブレンドによる手入れが施されていた。損傷に対する補修方法を，最新の補修技術を含め表1にまとめる。

このような状況において，新しい補修技術が開発され，適用されつつある。さらに，高温部品の延命化・長寿命化に対する強い市場要求があり，図４に示すような新しい寿命延伸技術が開発され近年広く実用化されている。以下に，現在ガスタービン高温部品に適用されている最新の補修技術と寿命延伸技術・再生技術の概要を紹介する[3]。

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

表１　高温部品の損傷と補修技術

部　品	損傷形態	従来補修技術	最新補修技術
燃焼器	(1) 亀　裂	溶接補修	―――
	(2) 摩　耗		(2) 耐摩耗処理
	(3) 酸　化		(3) 耐酸化ｺｰﾃｨﾝｸﾞ施工
	(4) 変　形	変形修正	―――
	(5) 材料劣化	再生熱処理	―――
	(6) TBC剥離	リコーティング	―――
静　翼	(1) 亀　裂	溶接補修	(1)(2)拡散ろう付け補修
	(2) 酸　化		
	(3) 材料劣化	再生熱処理	―――
	(4) TBC剥離	リコーティング	―――
動　翼	(1) 亀　裂	ブレンド手入れ	―――
	(2) 打　痕		―――
	(3) チップ部損傷		(3) 溶接補修
	(4) 材料劣化	―――	(4) ＨＩＰ再生化処理
	(5) コーティング劣化	リコーティング	(5) リコーティング

4.1　補修技術

4.1.1　動翼の溶接補修

動翼は高温の遠心力場で使用されるため，高温強度の高いNi基耐熱超合金を使用しているが，1300℃級ガスタービンでは第１段動翼の先端部が高温酸化減肉する事象も認められている。このNi基耐熱超合金は難溶接材であるが，近年の技術開発により翼先端部の補修に限り再生溶接が可能になっている。一つの方法として，TiやAl量の多いNi基耐熱超合金は難溶接材で溶接入熱が大きいと高温割れの発生が懸念されるが，その懸念を最小限に抑える低電流電源によるTIG溶接法がある。また，GE社により開発された溶接割れを防止する新しい溶接法（WRAP™溶接）[4]は，高温でのNi基耐熱超合金の材料特性を利用したもので，動翼先端部の補修に適用し，再利用率改善に効果を挙げている。図５（a）に，WRAP™溶接法により修理した第1段動翼先端部の写真（整形過程）を示す。また，カスタマイズした修理メニューも準備している。これにより，修理範囲も必要最低限とし，修理コスト低減と納期短縮に寄与している[2]。

4.1.2　動翼リコーティング

翼の長時間使用に伴いコーティングも劣化し，基材の保護機能が損なわれるが，コーティング及び基材表面の劣化状況を踏まえた最適時期に新しいコーティングを再施工（リコーティング）することにより，基材の劣化を抑えて延命化を図ることが可能となる。

リコーティングは,翼表面と冷却空気通路内面の劣化した古いコーティング層を化学的・物理的手法により除去し,新しいコーティングを施工する修理技術である。耐酸化コーティングの再施工には,大気中での溶射で緻密な皮膜が得られる高速ガス炎溶射（HVOF）が用いられ,さらに,翼外表面コーティングの耐酸化性を向上させると共に翼内部の冷却空気通路部の耐酸化コーティングを施工するためにアルミナイズプロセスが追加される。図５（b）に，第１段動翼にリコーティングを施した例を示す。

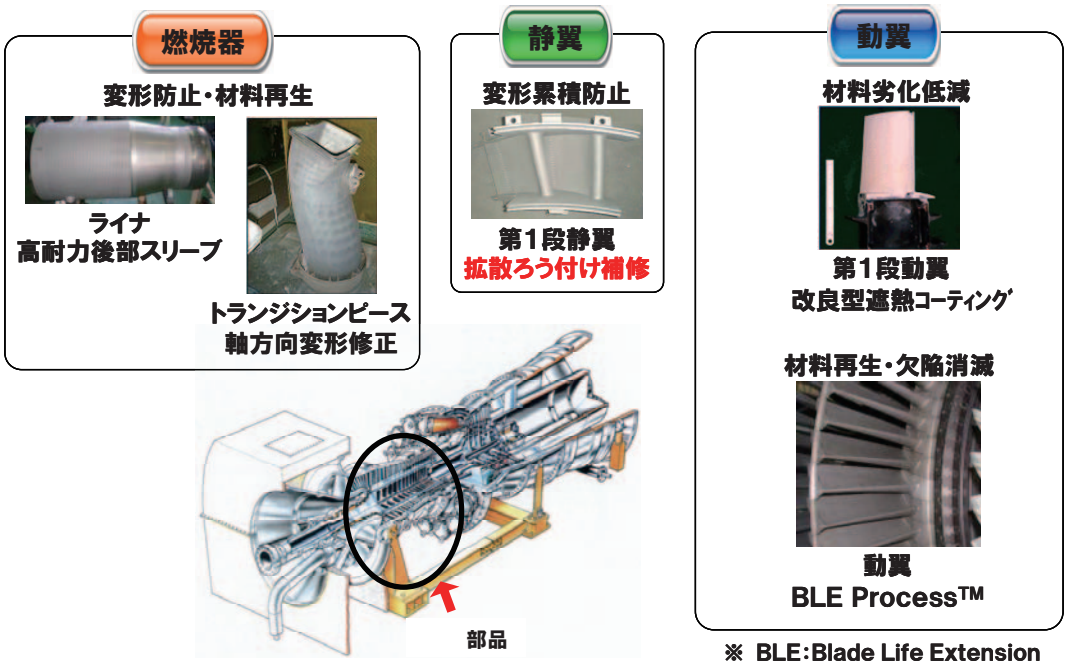


図４　ガスタービン寿命延伸・補修技術

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

(a) 先端部の再生溶接
(WRAP™)

(b) 動翼リコーティング

図５　再生溶接およびリコーティングコーティング後の第１段動翼

4.2　寿命延伸技術

4.2.1　動翼寿命延伸技術BLE Process™

動翼の寿命延伸技術であるBLE Process™（BLE: Blade Life Extension）は，修理基準を満たせば動翼を繰り返し再生することが可能な技術である（図６）。

ガスタービン動翼は，運転経過と共にクリープ損傷が進行し，寿命を消費する。この劣化した動翼に対して1000℃・1000気圧以上の高温高圧下にて特殊熱処理を行うことにより，初期鋳造欠陥に加え，高温下の運転で経年的に材料劣化し，その結果，発生するクリープボイドを消滅させるとともに内部金属組織を再生させるHIP（Hot Isostatic Pressing）再生化処理技術を当社独自に開発しており，実機適用している[(2),(4),(5)]。これまでの技術検証では，材料強度が新翼以上の状態まで回復することが確認されており，1100℃級ガスタービン（9E／7E型）動翼や1300℃級ガスタービン（9FA／7FA型）の動翼にて実機適用され，良好に運転中である（図７）。また，動翼の先端部では，経時的なクリープ変形が発生することがあるが，これらの変形を修正する技術も開発しており，HIP再生化処理と併用して適用することにより，その動翼としての寿命延伸効果を最大限に活かすことが可能となっている（図８）。

BLE Process™翼の実機運用後の劣化調査を実施した。調査翼は，約72,000時間実機運用し管理寿命に到達した第2段動翼をBLE Process™により再生化し，実機で約35,000時間運用された翼で再生化前の運転時間も合わせると実機での総運転時間は約107,000時間にもおよぶものである。図９にクリープ試験結果を新翼から約72,000時間運転翼と比較して示す[(6)]。BLE Process™翼のクリープ破断寿命は実機で約35,000時間運用されたため新翼よりは低下しているものの，新翼から約72,000時間運転翼より低下量は小さい。更に新翼最小値と新翼から約72,000時間運転翼最小値から得られるクリープ寿命消費予測線上にあることから，BLE Process™翼のクリープ寿命消費速度は新翼と同等である。また，BLE Process™にて再生後，寿命まで実機に組み込み運転した翼に２回目のBLE Process™を適用した翼の金属組織およびクリープ試験結果を図10に示す。１回目の再生

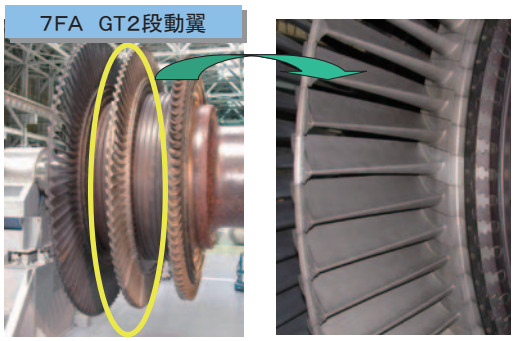


図７　BLE Process™翼の実機組込状況

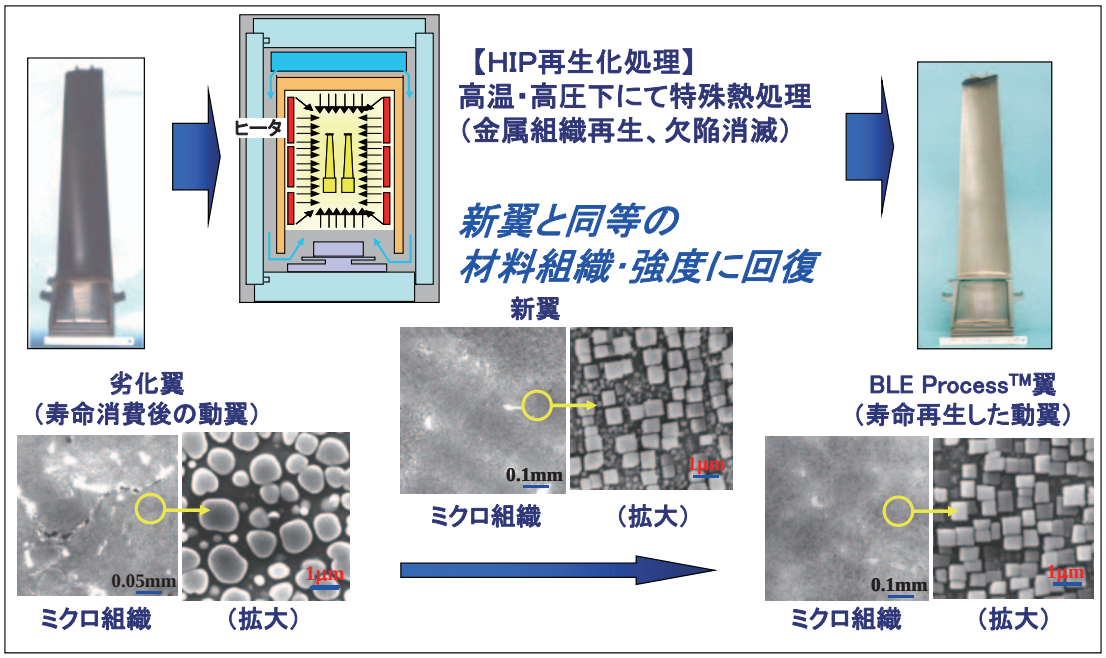


図６　BLE Process™翼の実機組込リサイクル

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

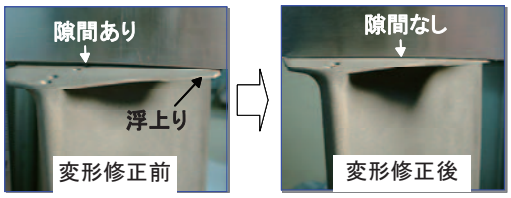


図８　動翼チップシュラウド部の変形修正

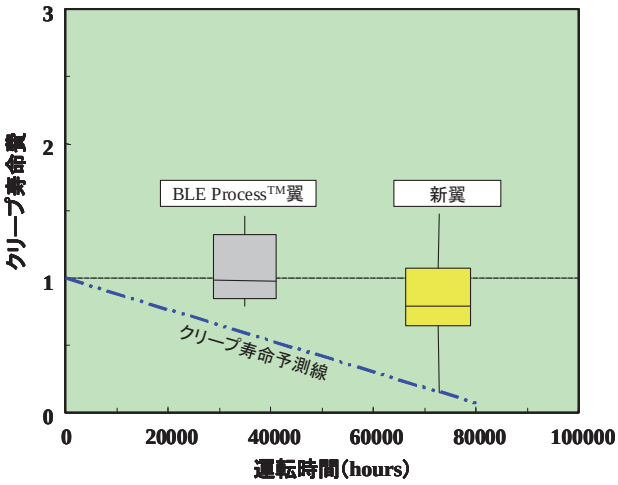


図９　BLE Process™翼運転後のクリープ試験結果

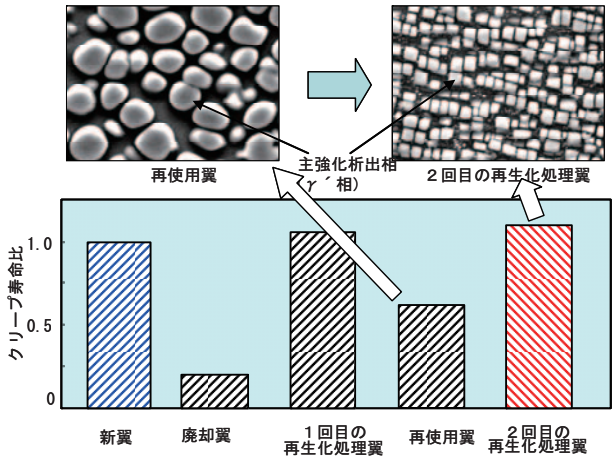


図10　２回目再生化処理翼の金属組織およびクリープ寿命

処理と同様に，金属組織が再生し材料強度が新翼以上の状態に回復することを確認した。このように，BLE Process™は，繰り返し翼を再生して運用していくことを可能にしている。

4.2.2　動翼への高性能遮熱コーティング

動翼基材の温度低減による長寿命化を目論み遮熱コーティングが採用されている。さらに，コーティング層の気孔率を制御し，従来の遮熱コーティングより格段に遮熱性能が優れ，基材の劣化を抑えて延命化を図る高性能遮熱コーティングも開発している。高性能遮熱コーティングをガスタービン動翼の外周に位置するシュラウドセグメントに適用したものを図11に示す。実機に適用され良好に運転中である。

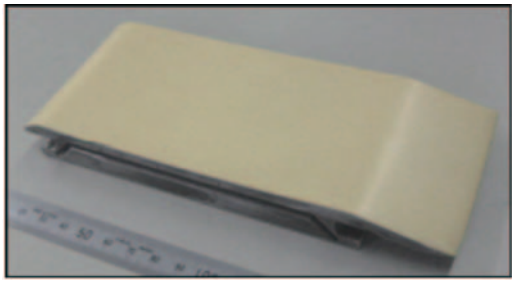


図11　シュラウドセグメント内輪への高性能遮熱コーティング適用

4.2.3　静翼の拡散ろう付け補修

従来技術では，修理前にき裂・酸化減肉部分の除去が必要であり，また，補修量の増加と共に入熱が大きくなるため，翼の変形も増大する。この問題に対して，広範囲な補修であっても変形なく，高品質な補修を実現する補修方法として拡散ろう付け補修が開発され，広く実機に適用され寿命延伸に貢献している。

拡散ろう付け補修は液層拡散接合技術の応用例として位置付けられ，基材と同等の合金粉末とろう材粉末を混合させた補修材料を補修部に充填し，真空中で拡散熱処理を施すことにより補修部を基材と同等レベルにする技術である[7]。図12に，拡散ろう付けにより補修した静翼を示す。また，オプションとして，HIP処理も必要に応じて適用し，信頼性の向上が可能である。

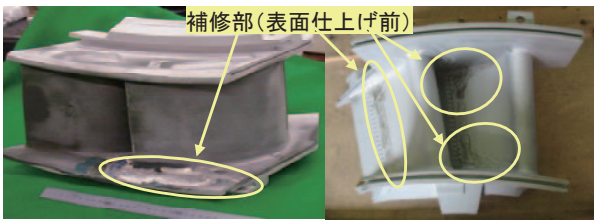


図12　拡散ろう付け補修静翼（表面仕上げ前）

4.2.4　クーポンリペア

高温部品の補修方法は各々の部品の損傷形態により選定されるが，燃焼器ライナやトランジションピースでは一部分のみ損傷が進み，その部位の劣化・損傷のために，大半の部位の損傷が軽微であるにも拘わらず交換を余儀なくされる場合がある。また，タービン静翼ではタービン入口温度の上昇に伴い複雑な冷却構造を採用している機種もあり，損傷によっては補修が効かず，寿命到達前に交換となる場合もある。この問題に対して，損傷部分のみを切り取り，取替部品と交換して，部品寿命を全うさせる修理方法としてクーポンリペアがあり，燃焼器部品やタービン静翼に適用されている。図13に，クーポンリペアによる燃焼器部品（燃焼器ライナ）の修理例を示

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

す。これはオリジナル部品に対して，高耐力後部スリーブを適用したもので，寿命延伸をはかるものである。

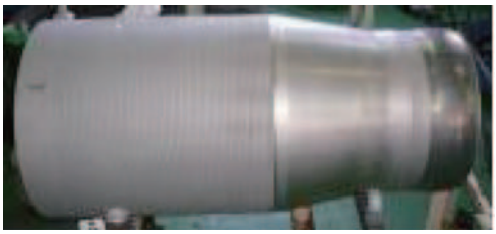


図13　クーポンリペアによる燃焼器部品修理例

4.2.5　燃焼器の耐摩耗処理

燃焼器部品の支持部や取合部では燃焼振動や機械振動により激しい摩耗が発生し，この摩耗が点検時期を決定する要因となっている。従来はステライトコーティングが用いられていたが，CrCコーティングを適用することにより大幅な改善が実現され，摩耗率が従来の1/5以下に低減している。

5．おわりに

火力発電の主力となりつつあるコンバインドサイクル発電設備や，シンプルサイクル発電設備に用いられているガスタービンは，効率向上を図るため高温化が進み，現在，1500℃級のプラントが運用に入っているが，1100℃級，1300℃級のプラントの運転実績は豊富に蓄積され，ガスタービンの保守管理技術は着実に確立されつつある。また，補修技術･寿命延伸技術はガスタービン保守の重要な技術要因であり，日々改良が施され，新技術が適用されている。

ここでは，実機におけるガスタービン高温部品の損傷状況を示すと共にこれまでに開発され，実機適用されている最新のガスタービン補修技術，市場ニーズの高い寿命延伸技術とその効果について概要を示した。

今後は，市場ニーズに合ったガスタービン保守技術の開発を推進するとともに，日々進化している次世代ガスタービンに対応する保守技術を確立する必要があると考える。

WRAPは，General Electric社の商標です。また，BLE Processは，株式会社東芝の商標です。

参考文献

(1) 石井潤治,「発電用ガスタービン高温部品の余寿命診断と予防保全」，日本ガスタービン学会主催第30回ガスタービンセミナー講演集,（2002）
(2) 石井潤治．ガスタービン高温部品の補修技術．日本ガスタービン学会誌．29, 5, 2001, p.18-23
(3) 酒井義明，佐藤岩太郎，斉藤大蔵「ガスタービン高温部品の寿命延伸技術」，日本ガスタービン学会誌　Vol.37 No.1（2009）
(4) Pallos, K. J., “Gas Turbine Repair Technology”, GER-3957A, GE Power Systems,（2000）
(5) 石井潤治．ガスタービンの最新補修・寿命延伸技術．火力原子力発電．53, 7, 2002, p.62-71
(6) 伊藤明洋．ほか．HIP処理によるガスタービン動翼材の特性回復．火力原子力発電．53, 3, 2002, p.71-76
(7) Saito,D., et al. “Development and Application of Repair Technology for Land-base Gas Turbine Nozzles”, Proceedings of the IGTC2011, Osaka, Japan,2011-11, IGTC2011-74.

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

特集：最新のガスタービンにおける修理・補修技術

エアラインにおける航空機用エンジン部品の修理技術開発の現状

中野　剛*1
NAKANO Tsuyoshi

キーワード：DER，PMA，FAA，Repair，CF6，PW4000，修理開発，修理専門会社，航空局

1．はじめに

航空機エンジンの性能向上は，近年目を見張るものがあるが，組み込まれる内部構成部品に要求される強度，耐久性等も増々高くなってきており，同時に部品価格も上昇している。民間機用航空機エンジンは，状況に応じて分解整備時期を決定するオン・コンディション整備方式が採用されており，通例数年毎に機体から取卸され，分解整備が行われる。この際，所定のマニュアルに従って部品は検査されるが，不具合が発見され，修理が許容されないものは廃棄されることになる。エアラインビジネスはLCCの参入もあって厳しさを増してきており，従来修理不可であった部品を強度，性能等を損なうことなく修理し，新造部品購入を抑制してコスト削減に繋げるべく，修理技術開発に注力している。

本報では，日本航空における航空機エンジン部品に対する修理技術開発の取り組みを紹介する。

2．修理技術開発の現状

航空会社における部品修理は，概ね以下の手順に沿って進められる。

基本はメーカーマニュアルによる修理
↓
メーカーマニュアルにて修理不可の場合，
自社修理を検討，メーカーに提案
↓
自社修理が認められない場合，メーカーに修理開発を依頼
↓
メーカー修理が不可の場合，
FAA DER（Designated Engineering Representative）
Repair開発を修理専門会社に依頼
↓
部品の損傷が著しく，DER Repairでも修理が難しい場合，または部品構造が単純・安価で修理に適さないにも拘わらず，多数の購入が必要となる場合
↓
専門業者に依頼し，FAA PMA（Parts Manufacturing Approval）部品開発・購入を検討

次に具体例を交えながら，部品修理における各手順について紹介する。

2.1　航空会社自社での修理開発

航空機エンジン部品の多くは高額である為，OEM Manualで修理が不可とされる場合でも，個々の損傷に対して修理方法を検討，立案し，詳細な検査結果とともにメーカーに送付し，承認を得て自社修理を実施している。例として2011年３月11日，東日本大震災にて激しく

図１－１　給油車両と接触して損傷した排気ノズル

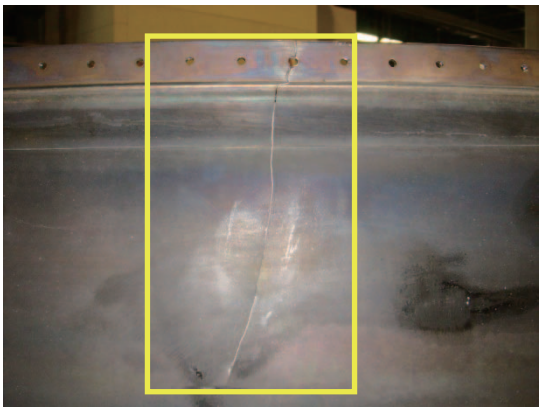


図１－２　亀裂が発生した排気ノズル外皮

原稿受付　2012年５月20日
＊１　JALエンジニアリング　エンジン整備センター
技術開発グループ
〒282-8610　成田市成田空港内JALエンジンメンテナンスセンター

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

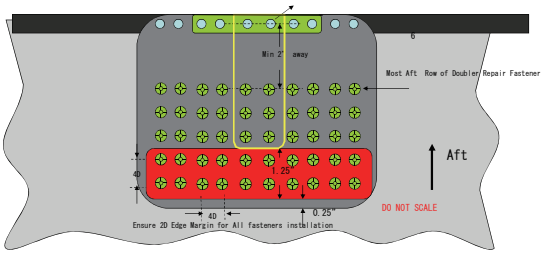


図１－３　承認されたDoubler Repair概要

揺れるボーイング777型機エンジン後部が給油車両と接触，損傷した排気ノズルの修理例（図１）を示す。当初メーカーは修理不可としていたが，日本航空で詳細な修理手順を作成，提案し，最終的に自社修理が認められたもので，大幅なコスト低減に寄与している。

2.2　FAA DER Repair

2.2.1　DER Repair適用までの手続きについて

米国ではFAAが行う検査，承認行為を民間の専門家に委任する制度が以前から確立されており，委任された個人はDER: Designated Engineering Representativeと呼ばれている。

DERには，FAAに認定された範囲において，航空機又は装備品等の修理設計データを承認する権限が付与されており，主に米国の修理専門会社に所属する者が多いが，中には独立して業務を行うConsultant DERも存在する。

日本国内で航空機部品に対してDER Repairを適用するには，以前は個別に航空局の承認を得る必要があったが，サーキュラー No.3-026“米国連邦航空局が承認した修理設計データの取り扱いについて“が発行され，2011年７月以降，DER Repairの適用方法が変更されている。これは，米国との間で締結した「航空の安全の増進に関する日本と米国との間の協定　BASA：Bilateral Aviation Safety Agreement)」に基づき，航空機部品の修理について，FAA又はFAAから一定の権限を委任された者（DER またはODA：Organization Designation Authorization）が承認した修理設計データを受け入れることとなった為の措置で，航空機部品にDER Repairを適用するには，それを請け負う修理専門会社が日本国航空局から修理改造認定事業場として承認される必要がある。

DER Repair開発元の修理会社に修理改造認定事業場を取得させるには一定の時間を要するため，修理プロセスが確立されている場合でも，タイムリーに高額なエンジン部品を修理する事が難しいのが実情である。
尚，DER Repairを適用して修理した部品を組み込んだエンジンを機体に装着した場合，トレンド・モニタリングを実施し，当該修理品の不具合等により装備品等が通常よりも早く取り卸される等の傾向が見られる場合は，航空局への通報が規定されていることを付言しておく。

2.2.2　DER Repair適用について

従来，エンジンメーカーでは自社で開発した部品修理技術の内，難度の高いものはライセンス修理に指定していたものの，概ね航空会社に対して開示することに大らかであったが，近年では多くを非開示としてメーカーのみが修理可能とし，高額な修理価格を設定する対応が目立ってきている。加えて新造部品価格の上昇も著しい。参考まで新造高圧第1段タービンブレードの価格は図２に示す通り，新型エンジンでより高額な設定がされていることが分かる。

最近では，メーカーがエンジン整備，部品修理をトータルで，割安に提供する形態が拡大しつつあり，航空会社にとってはエンジン分解，組立を自社にて実施し，部品修理だけをメーカーに頼るやり方では，コスト的なメリットを得にくくなってきている。現にボーイング777型機を保有する航空会社は多いが，装備されるGE90型エンジンの整備を自社で行っているのは一部の航空会社に留まっている。

日本航空では，エンジン整備コストを一層低減する観点から，メーカーマニュアルにて修理不可と判定され，自社での修理開発が難しいと判断された場合でも，高額

図2-1　CF6-80C2高圧第１段タービンブレード　単価：約90万円

図2-2　GE90-115B高圧第1段タービンブレード　単価：約190万円

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

なエンジン部品に対する修理を断念するわけでなく，状況に応じて修理専門会社にDER Repair開発を依頼している。

DER Repairは，米国Chromalloy社に代表される修理専門会社で開発される事例が殆どであるが，中には実エンジンを使用して実証試験を行い，数年かけて漸く実用化されるような高度な修理も存在する。

2.2.3　DER Repair具体例（その１）

従来，IAE社製 V2500型エンジンではマニュアル上，高圧圧縮機ブレードチップ部への溶接修理は許容されていたが，前縁部に磨耗が生じてリミットを超過した場合の修理方法が設定されておらず，多数のブレードを廃棄せざるを得ず，整備コストを押し上げる要因となっていた。この為，専門修理会社に依頼し，高圧圧縮機ブレード前縁部への溶接修理開発を依頼した。開発にあたっては，ブレードの母材 Ti-6Al-4V材に対し，溶接前と溶接後のサンプルピースを作成，引張強度，疲労特性，金属組織解析等を実施し，本DER修理における材料の機械特性上，問題無い事を確認しており，これらをもって航空局から実部品への適用承認を得ている。

本溶接修理適用によるコスト削減効果は大きく，DER Repairが航空会社にとって無くてはならない存在になりつつある現状を示している。図３にV2500 高圧圧縮機第４段ブレードにおける修理適用例を示す。

図３　V2500型エンジン　高圧圧縮機第４段ブレードDER Repair適用例（前縁部への溶接修理はメーカーマニュアル上は不可）

2.2.4　DER Repair具体例（その２）

CF6-80C2 高圧タービン第１段ノズルは，エンジン運転中の高温により，翼部の損傷が激しく，プラットフォーム部（側板）の損傷が軽微であるにも拘わらず，廃棄を余儀なくされることが多い。その為，リバースエンジニアリング手法にて翼部を安価に製作し，翼部を交換するAirfoil Replacement Repair（AFR）が確立されている。最近ではPlatform部を交換することも可能となっている（図４参照）。

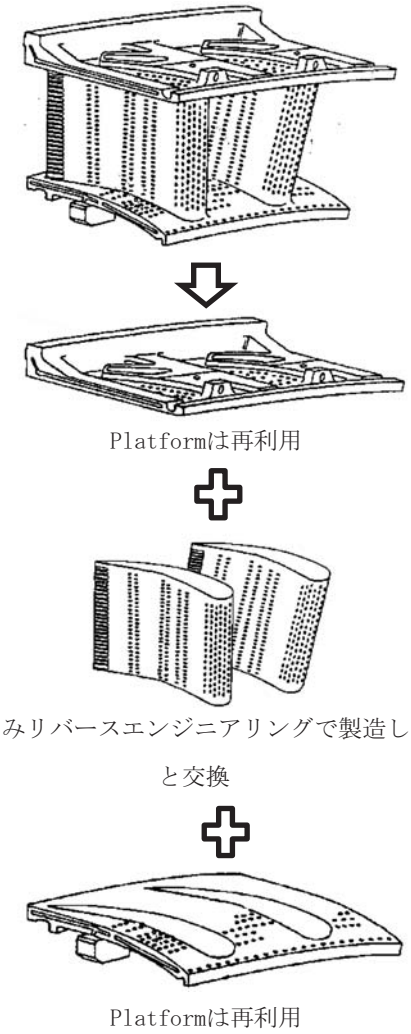


図４　CF6-80C2型エンジン高圧タービン第1段ノズルAirfoil Replacement Repair

2.3　PMA部品について

2.3.1　PMA制度について

エンジンに装備される部品は，エンジンメーカーが作成した部品リストに部品番号が指定されており，これら指定部品のみ使用することが可能であるが，例外としてFAR（Federal Aviation Regulation）Part21-303には，FAAから承認を取得して，部品を製造することが出来るPMA（Parts Manufacturing Approval）制度が認められている。

航空機エンジン用PMA部品を製造する場合，FAA ACO（Aircraft Certification Office），または ECO（Engine Certification Office）による設計承認取得後，検査・品質保証体制を確立し，MIDO（Manufacturing Inspection District Office）による製造者承認を取得する必要があるが，その際の評価は以下のように行われる。

・型式証明で承認されている部品と同一又は同等な図面に基づき製造されていること。
・または試験等によって耐空性の評価がなされること。

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

また，日本においては以前はPMA部品を装備する航空機が，米国の型式証明を持つことが必要であった。つまり，フランスの型式証明を持つエアバス機に対してはPMA部品を適用することが出来なかったが（注１），サーキュラー No.3-009が改定され，2011年７月以降，米国外の型式証明を持った航空機に対してもPMA部品の適用が可能となった。尚，サーキュラー上，PMA部品の導入決定は航空会社の責任とされており，日本航空では部品信頼性が十分に確保されていることを確認した上でPMA部品採用決定を慎重に行っている。

（注１）装備されるエンジンが米国製の場合，以前からPMA部品適用は可能であった。

2.3.2　PMA部品の活用

2.3.2.1　PMA部品具体例（その１）

高度技術を駆使して製造されるタービンブレードは，新型エンジン開発の度に価格が上昇しているが，過酷な環境に晒されるが故に消耗も激しく，エンジン整備上の主要なコスト要因となっている。

この為，タービンブレードに対するPMA部品の要望は多く，Chromalloy，Lufthansa, United Airlines 3社の合弁会社であるBELAC社では，CF6-80C2をはじめ，PW4000, CFM56-3の高圧タービン第1段ブレードをPMAとして製造，供給しており（図５参照），実エンジンを使用しての実証試験等も十分になされている。既に大手航空会社で数年以上使用されている実績があるが，これまでの実運航では特段問題は発生していないようである。

ジェットエンジン整備では，高圧タービンブレード購入費がコストの半分以上であることが多く，PMAブレードはエンジン整備コストを大幅に低減する選択肢であるものの，万一運航中にタービンブレードが破損した場合，後段ブレード，ノズルが大きな損傷を受けること，飛行中のエンジン停止は顧客からの信頼を失い，企業としてのダメージが大きいこと等から，他社での運用実績を十分に検討した上で進めることになる。

図５　BELAC社製 PW4000高圧タービン第１段ブレード

2.3.2.2　PMA部品具体例（その２）

エンジンに繰り返し作用する荷重に対しても高い信頼性を満たす為，ディスク，シャフト等には寿命が設定されており，LLP（Life Limited Parts）と呼ばれている。LLPに対するPMA部品開発は高い技術力とコストを要することから，従来あまり行われなかったが，世界のジェットエンジン製造三大メーカーの一つ，P&W社ではCFMI社製CFM56-3用のLLPをPMA部品として開発，製造している（図６参照）。規制の厳しいLLPのPMA製造は従来では難しいとされていたが，エンジン開発に豊富な経験を持つP&W社のような大手エンジンメーカーがPMA部品製造に加わることは，厳しいコスト競争を余儀なくされている航空会社にとっては朗報と言える。

但し，厳しいコスト環境の為，航空会社は航空機を自社保有とせず，リース購入することが一般的になりつつあるが，PMA部品の採用は機材価値を低下させるとの理由から，使用を制限するリース会社も多く，航空会社との間で軋轢を生じるケースも出てきており，今後PMA部品の取り扱いがどのように推移するかは不透明となってきている。

図６　P&W社製造のCFM56-3型エンジン用PMA部品

2.4　DER Repair/PMA部品採用後のエンジンモニタリングについて

DER Repair/PMA部品は，いずれもFAAの承認を受けているが，OEM部品に比して運用実績に乏しいことは否めない。そこで，これらを採用した後，運転時間，サイクルの上昇に伴い，不具合発生の有無を確認するため，エンジンモニタリングが重要性を増すことになる。エンジンモニタリング手法については，潤滑油消費量（OCR：Oil Consumption Rate）モニタリングや，潤滑油分光分析プログラム（SOAP：Spectrometric Oil Analysis Program），また主要なパラメータ（回転数，各部の圧力，温度，燃料流量，振動値等）の毎フライトでの変化を監視するエンジン・コンディション・モニタリング（ECM：Engine Condition Monitoring）が良く知られているが，最近では空地通信システム

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

（ACARS）を用いて，エンジンデータをメーカーに直接送付することにより，リアルタイムでそれらを監視できる遠隔診断システムが大きな役割を占めている。P&W社ではADEM（Advanced Diagnostics & Engine Management），GE社 で はRD（Remote Diagnostics）と呼ばれる遠隔診断システムでは，メーカーは，自社でのノウハウや各航空会社からの情報・経験を基に，独自のアラートレベルを設定し，それを超過した場合，航空会社に通知がなされ，予防整備を促すものである。遠隔診断システムにより検知され，エンジンメーカーからの緊急通知にて事前に不具合が発見された事例を図７に示す。

図７－１は当社777型機において検知されたEGT（排気ガス温度）の変化を示している。通常，エンジンの内部劣化に伴って，EGTは徐々に上昇していくが，2010年10月22日頃，急激に上昇していることが分かる。同時に図７－２に示す高圧ローターの振動も急激に上昇しており，このことから，高圧タービンブレードの破損を予見して，ボアスコープ検査を実施したところ，図８に示す第１段タービンブレードの損傷が発見され，当該エンジンは交換となっている。放置すれば，後段が更に損傷を受けていた可能性が高く，モニタリングの重要性が理解できる一例と言える。

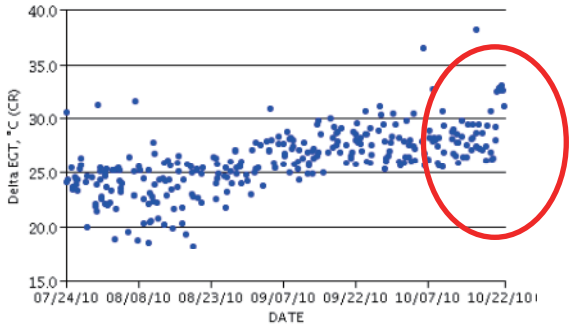


図７－１　当社777型機において遠隔診断システムにて検知された排気ガス温度の変化

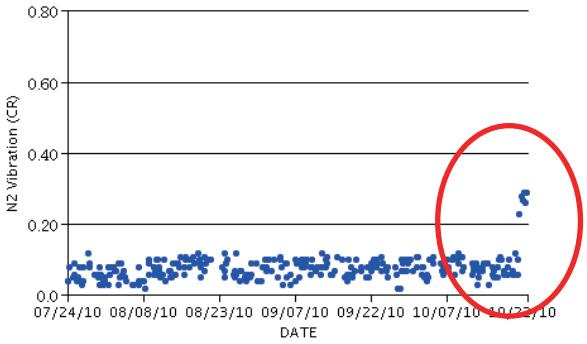


図７－２　当社777型機において遠隔診断システムにて検知された高圧ローター振動の変化

図８　エンジンメーカーからの緊急通知で発見されたPW4000 高圧タービン第１段ブレードの破損状況

３．終わりに

民間航空においてはLCCの出現等により経営環境が一層厳しさを増しているが，比較的小規模の航空会社では難しいと思われるエンジン部品の修理技術開発への取り組みを紹介した。修理開発は，新型機の実際の運航開始から数年が経過してエンジンが分解され，個々の部品不具合が発現してから行われる為，後手に回ってしまう傾向にある。

近年，日本の製造メーカーもP&W社，GE社等のリスクシェアリングパートナーとして，エンジン開発に参画しているが，開発の段階から修理方法を考慮した部品設計を期待するとともに，ユーザーとメーカーが情報を共有し，より迅速且つ的確な修理開発が行われることを期待したい。

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

特集：最新のガスタービンにおける修理・補修技術

コールドスプレー技術

大野　直行*1
OHNO Naoyuki

キーワード：Cold Spray，Kinetiks Spray，補修，肉盛り，熱処理

1．はじめに

コールドスプレーの原理は，1980年代半ばにロシア科学アカデミー（Institute of Theoretical and Applied Mechanics of the Russian Academy of Sciences Siberian Branch）にてA.Papyrinによって発見された[1]。

1990年代になると，米国，欧州の多くの大学，研究機関から研究発表がなされる様になった。コールドスプレー法は，他の溶射法に比較して，ガスの流れ，粒子の加速，加熱現象が比較的単純であることから，数値解析，シミュレーションを用いた研究発表[2]が多数なされている。現在では，コールドスプレーまたは，キネティックスプレー装置として市販されるようになり，コールドスプレーの原理的な研究とともに様々なアプリケーションへの適応開発も盛んに行なわれている。

当社では，2000年代に入りコールドスプレー法の研究を始め，2002.9に米国で開催されたCold Spray 2002より本格的にコールドスプレーによる加工および装置販売に向け開発を進めてきた。現在では，ガス圧力5.0MPa，ガス温度1000℃での通常運転が可能な，世界最高水準の性能を有するコールドスプレーメーカーとなっている。図１に現在当社で販売中のコールドスプレー装置PCS-1000の写真を示す。

図１　コールドスプレー装置　PCS-1000

原稿受付　2012年５月24日
＊１　プラズマ技研工業㈱
〒369-1214　埼玉県大里郡寄居町今市４－１

2．コールドスプレー法とは

コールドスプレー法は，粉末材料を溶融温度以下の固相状態で基材へ衝突させ，成膜する技術である。この点が，材料を溶融させて基材に付着させる溶射法と大きく異なる点である。しかし，粉末材料を低速で基材に衝突させても成膜されない。そこで，コールドスプレー法では，超音速ノズルを用い高速ガス流を発生させ，そのガス流中に粉末粒子を投入することにより衝突速度を上げ，材料粒子を基材に高速に衝突させる。

コールドスプレー法により形成される皮膜は，

・大気中で酸化の無い緻密な皮膜が得られる。
・材料粒子への熱影響が少なく，熱変質を抑えられる。
・成膜速度が速い。
・厚膜が可能である。
・付着効率が高い。

など，従来の溶射法には無い特性を有している。特に成膜速度が速く，厚膜が可能なことから皮膜としての考え方から構造材料としての用途にも注目を集めている。図２にコールドスプレー法と従来の溶射法の粒子温度と粒子速度の関係を示す。

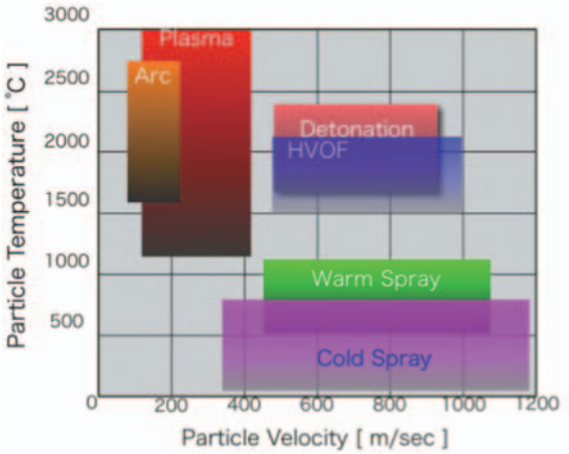


図２　溶射法による粒子速度-粒子温度

3．コールドスプレー装置

図３にコールドスプレー装置の概要を示す。コールドスプレーシステムは，ガスコントロールユニット，ヒーター，ヒーター用電源，粉末供給装置，コールドスプ

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

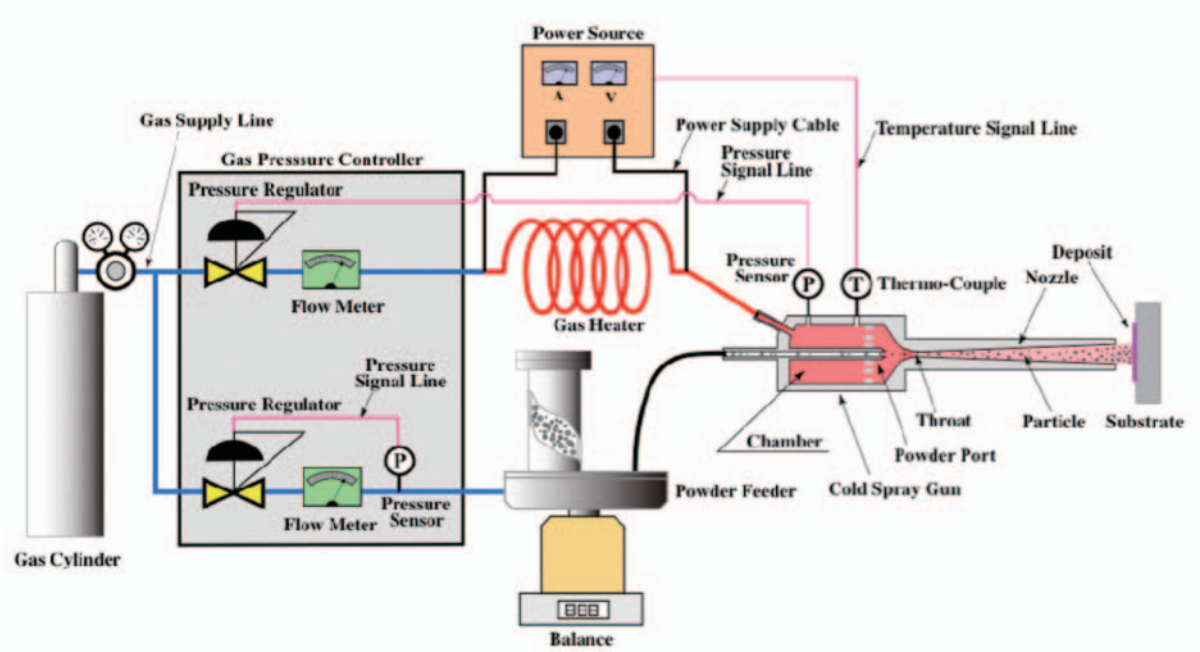


図３　コールドスプレー装置の模式図

レーガンから構成されている。この他，実際に成膜を行なうには，ガス供給システム，スプレーブース（作業防音室），集塵機，ロボット，冷却水ユニットが必要となる。

現在一般に販売されているコールドスプレー装置は，使用するガス圧力，ガスの加熱温度によって低圧低温型，高圧低温型，高圧高温型の３種類に分類される（表１）。低圧低温型は，低融点で比較的柔らかい金属（例えば，スズ，純アルミニュウムなど）を施工することが可能である。装置が比較的コンパクトに収まることから，現場での手動作業による補修に向いている。しかし，ステンレス，ニッケルなどの金属になると成膜効率が下がり，皮膜強度も下がってしまう。一方，高圧高温型は，インコネル，ハステロイ，チタン系合金を成膜することが可能で，高い付着効率（銀：99％以上，銅：98％以上，ニッケル：95％以上など）を実現することが出来る。しかし，ヒーターやガンが高温，高圧に耐えられる強度が必要になることから，重量が重くなってしまい現場での手動作業には，不向きである。このような点を踏まえコールドスプレー装置の購入の際には，必要な用途に合わせ検討されることをお勧めする。

以降の装置説明は，高圧高温型コールドスプレー装置を中心に説明を記載する。

表１　Cold Spray装置の分類表

	ガス圧力	ガス温度	
低圧低温型	～1.0MPa ～2.0MPa ～0.9MPa	315℃以下 300℃以下 550℃以下	KM-CDS(INOVATI) KINETIKS 2000(CGT) Dymet413(OCPS)
高圧低温型	～4MPa 0.7～3.5MPa	550℃以下 550℃以下	KINETIKS 4000/17(CGT) SST Series EP(SST)
高圧高温型	～5MPa ～4MPa	～1000℃ ～950℃	PCS1000(PGK) KINETIKS 8000 (CGT)

3.1　コールドスプレーガン

前記したようにコールドスプレー法では，粉末粒子を高速に加速し，衝突させることにより成膜する技術である。一般に，粒子が衝突し成膜を開始する衝突速度を臨界速度（Critical Velocity）と呼んでいる。この臨界速度は，粉末粒子の機械的特性，粒子サイズ，形状により異なり，付着対象物の機械的特性，表面形状によっても変化する。また，材料粒子の温度を上昇させることにより，塑性変形し易くなり低い値となる。

コールドスプレー法では，材料粒子を臨界速度以上に加速する為に超音速ノズル（Laval nozzle）を用いる。音速は，ガス種，ガス温度によって異なり，図４に示すように分子量の小さいガスの方が速くなり，温度が高いほど速くなる。コールドスプレー法は，一般的に窒素を用いられる。ヘリウムを用いた場合には，窒素を用いた場合の約３倍のガス流速を得ることが出来る。しかし，スロート部で３倍のガス流速を得られるということは，３倍のガス流量を流すことになる。ヘリウムは，大変高価なガスであるため，付加価値の高い部品でなければ使用することが出来ない。そこで，近年では，ヘリウムの回収装置を導入し，実際にテストプラントにて稼働を行なっている研究機関もある。実用プラントとして導入するには，かなり高価なプラントではあるが，昨今のヘリウムの価格を考えれば十分に回収できる投資コストであると考えられる。原理的に考えれば，水素を用いることが最も理にかなっているが，爆発の危険性から現実の生産には使用できない。しかし，窒素やヘリウムに少量の水素を混合し，ガス流速を上げることは可能であり，今後の開発課題の一つでもある。

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

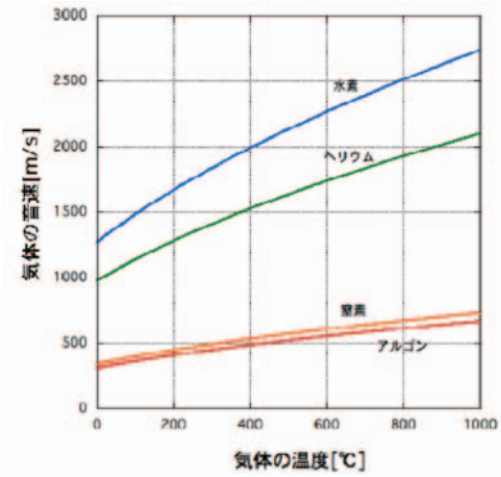


図４　気体の音速

４．コールドスプレー法による皮膜

図５（a）にコールドスプレー法および（b）にプラズマ溶射法により成膜した銅皮膜の断面組織写真を示す。プラズマ溶射法により成膜した断面組織には，材料粒子を溶融したことによる酸化物，粒子間未接合部が筋状に観察される。一方，コールドスプレー法による断面組織からは，筋状組織は，全く観察されない。図６に図５（a）の断面組織にエッチングを施した写真を示す。写真より粒子が一定の形で鱗状に積層しているのがわかる。

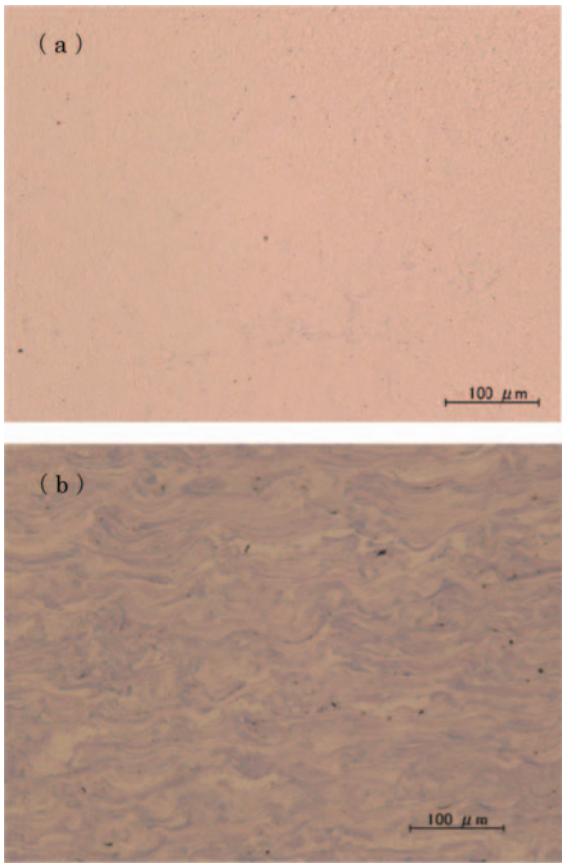


図５　銅皮膜の断面写真
（a）Cold Spray（b）Plasma Spray

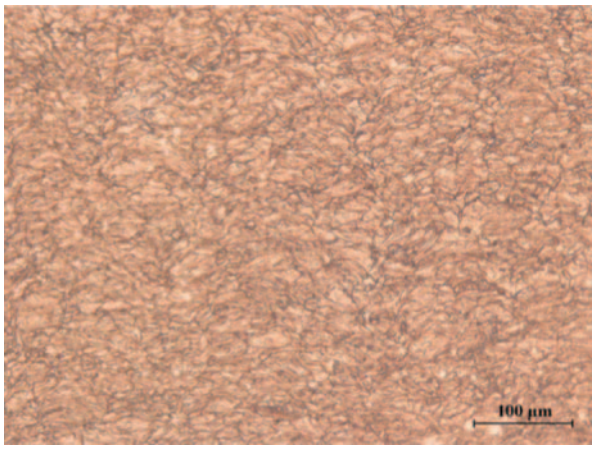


図６　銅皮膜の断面エッチング観察

このようにコールドスプレー法の皮膜は，基材に付着した粒子を後から衝突する粒子が押し潰すことを繰り返し積層していることがわかる。

４.１　皮膜の密着強度

コールドスプレー法による皮膜の密着強度は，その大部分が機械的アンカー効果によるものであると考えられる。一部に粒子が衝突した際の運動エネルギーが熱エネルギーに変換され金属間接合がなされているとの報告もあるが，詳細は解明されていない。ここでは，アンカー効果による密着強度について述べることとする。

コールドスプレー法の密着強度は，材料粒子および基材の機械的特性に大きく影響される。図７－１に作動ガスに窒素を用いた場合のA5052，SUS304基材に銅粉末を衝突させた粒子付着状態を断面から観察した写真を示す。銅粉末の強度よりも低いA5052には，銅粒子が食い込み基材が大きく変形している。他方，基材強度の高いSUS304では，銅粉末が大きく変形し，基材は，あまり

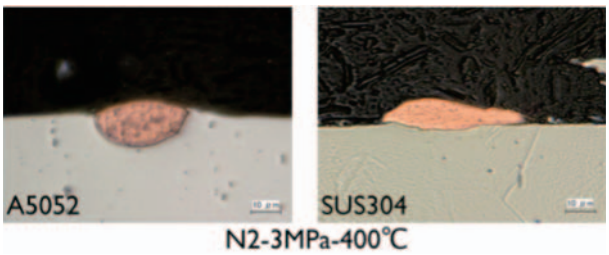


図７－１　作動ガスN_2を用いた場合のCu粒子付着状態

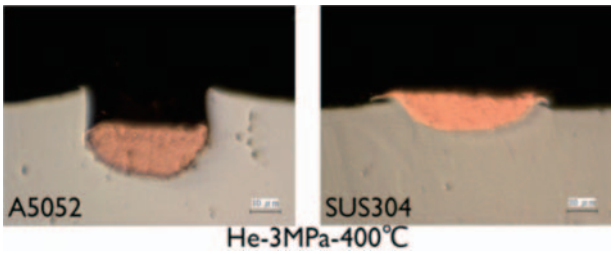


図７－２　作動ガスHeを用いた場合のCu粒子付着状態

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

変形していない。コールドスプレー法では，材料粉末の強度と基材の強度の組み合わせによって基材と材料粒子の塑性変形の状態が大きく変化し，アンカー効果，密着強度に大きな影響を与える。よって，アルミ基材に対する銅皮膜の密着強度は高いが，ステンレス基材への銅の密着強度は低いことになる。図７－２に作動ガスにヘリウムを用いた場合の断面写真を示す。ヘリウムを使用することにより銅粒子の衝突速度が上がりA5052基材には，窒素を使用した時より深く銅粉末が食い込み，SUS304基材には，基材に銅粉末が食い込みながら銅粉末が大きく塑性変形しているのがわかる。ヘリウムを使用したり，ガス温度を高くすることにより衝突速度を上げることは，密着強度を上げる手法として有意義な手法である。

４.２　皮膜の残留応力

コールドスプレーの皮膜は，材料粒子が皮膜に打込まれ，皮膜を押し広げようとする力が働きながら積層して行くため，皮膜に圧縮応力が残留している。よって，膜厚が厚くなるに従ってその圧縮応力は，膜全体に蓄積され大きくなっていく。その際，基材を変形させることにより応力を緩和する場合もあるが，基材が変形しない場合には，その応力は，膜を引き剥がそうとする力となって働く。膜を積層するに従い圧縮応力が徐々に増大していき，密着強度を超えると皮膜が剥がれてしまう。コールドスプレー法による厚膜形成の際には，下地層に十分密着強度の高い層を成膜する，成膜途中に加熱による応力緩和するなどの処置を行なう必要がある。

４.３　皮膜の機械的特性

コールドスプレー法の用途として皮膜としての用途のみならず，構造材料としての用途にも注目を集めている。今までの溶射皮膜では，基材の強度に合わせて変形することを求められても，皮膜自体に強度を求められることは無かった。そこで，当社では，コールドスプレー法にて厚膜形成した皮膜から引張り試験片を切り出し，様々な材料についてスプレー条件，後処理条件による皮膜の機械強度について調査を行っている。

図８－１にスプレー条件による銅皮膜の引張り強度の比較グラフを示す。グラフより，作動ガス温度が上昇するにつれ機械強度，伸びが増している。これは，以下の２点により皮膜の粒子間の結合力が増している為であると考えられる。①ガス温度が上昇するに連れ，ガス流速が上がり粒子間の結合が強くなっている。②粒子温度が上昇し，粒子の塑性変形がし易くなっている。

しかし，同時に測定したバルクの破断ひずみが30％程度なのに対し，最も強度の高かった，800℃でスプレーした皮膜でも破断ひずみは，0.3％程度で破断した。これは，コールドスプレー法による皮膜は，粒子間の機械的結合により支配されており，金属間結合などの結合が少ないことを示している。

４.４　皮膜の後処理

図８－２に図８－１の条件で作成した膜をアルゴン雰囲気中400，500℃で４時間熱処理し，引張り試験を行なった結果を示す。熱処理の結果，熱処理条件によってバルクと同等または，それ以上の伸びを示した。これは，コールドスプレー法による皮膜が熱処理を行なうことにより機械的な結合から粒子間で拡散現象が生じ金属間結合に変わったことを示している。コールドスプレーの皮膜は，粒子間に酸化物などの不純物が無く，粒子間が緻密に接触しているために後処理として少量の熱を加えることによって容易に金属結合を起こし，バルクに近い特性を示すことが出来る。

熱処理による効果は，機械的強度以外でも確認され，銅の電気伝導性は，熱処理前がバルクの80％程度であるのに対し，熱処理後は，95％まで改善されている。図９にステンレス基材へ銅皮膜を厚さ３mm成膜し，熱処理を施した後，３点曲げ試験を行った試験片の写真を示す。(a) は，試験片表面に成膜した試験片，(b) は板厚側端面に成膜を行なった試験片である。熱処理を施すこと

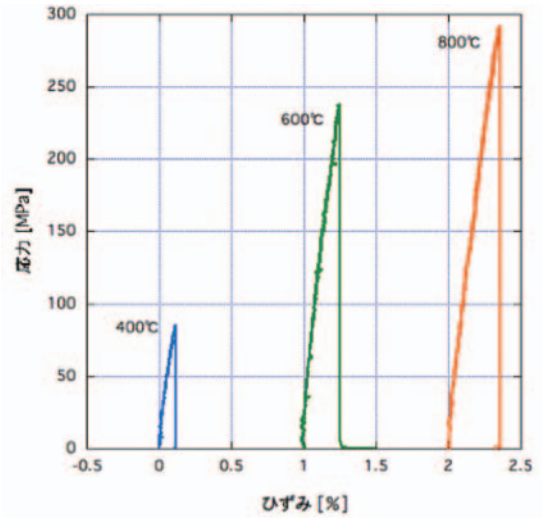


図８－１　Cu皮膜の引張り強度（As Spray）

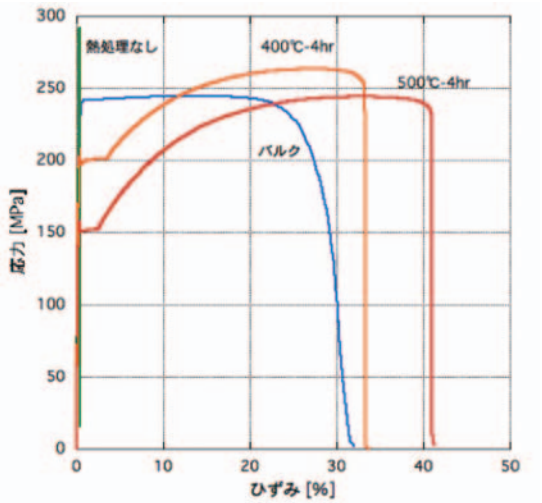


図８－２　Cu皮膜の引張強度（熱処理後）

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

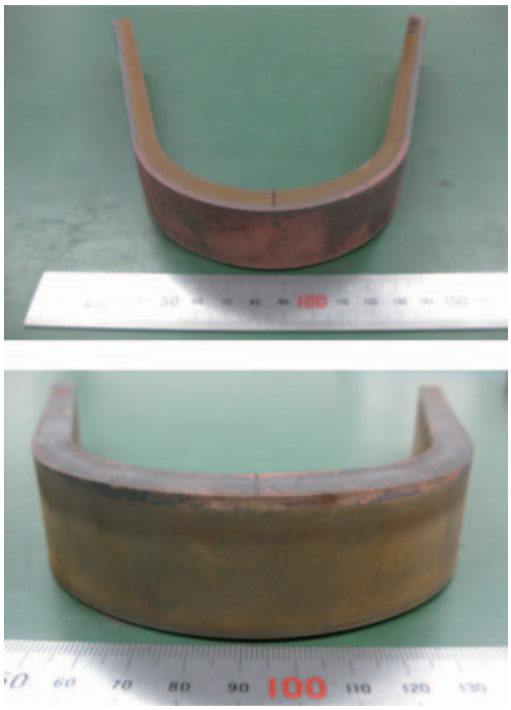


図９　熱処理後の銅皮膜の曲げ試験片（基材:SUS316L）
（a）Face Bend試験　（b）Side Bend試験

により写真の様な曲げを行なっても基材に追従し，間結合を起こし易く，バルク材と同等の性能を有する膜剥離，亀裂などを起こしていない。このように，コールドスプレー法の皮膜は，後処理により膜内の粒子が金属となることがわかってきている。今後も様々な材料に対し，同様な試験を行うことによりスプレー条件のみならず後処理の方法についても研究されることが望まれる。

５．ガスタービンへの適応

現在，ガスタービンメーカーによって高温基材へのコールドスプレー法の適用研究が行われている。タービンブレードへのNi基合金の肉盛り補修を始め，サーマルバリアコーティング（TBC）のアンダーコート，Ti系ブレードの補修などは，近年，実用例がでてくると思われる。

図10にInconel718，CoNiCrAlY，Ti-6Al-4Vの断面観察写真を示す。図11にインコネル718の皮膜を熱処理した後，膜から引張り試験片を切り出し試験を行った結果[3]を示す。結果よりインコネル718の場合1010℃２時間までの熱処理では，伸びが観られなかったが，1060℃２時間では，10%の伸びが観察され，1250℃１時間では，35%の伸びが観察された。引張り強度は，800MPaとバルク材に比較すると弱い値となっている。現在は，皮膜中に若干の気孔が観られている為に強度的には，バルク材より劣っているが，引き続き試験を行って行く予定である。

また，コールドスプレー法は，ガスタービン以外の周辺機器（熱交換器，発電機など）の部品にも適しており更なる適用が望まれる

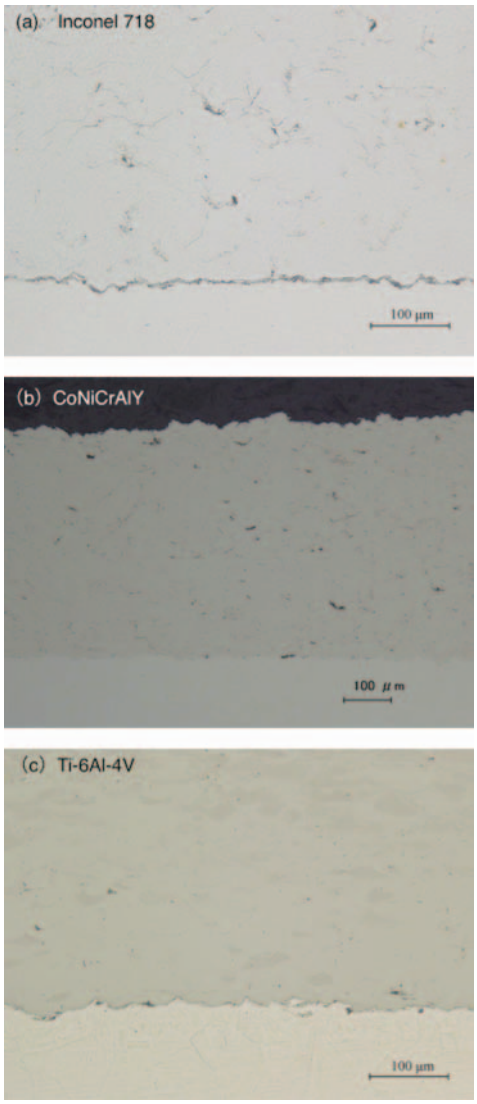


図10　コールドスプレー法による皮膜断面組織
（a）Inconel718（b）CoNiCrAlY（c）Ti-6Al-4V

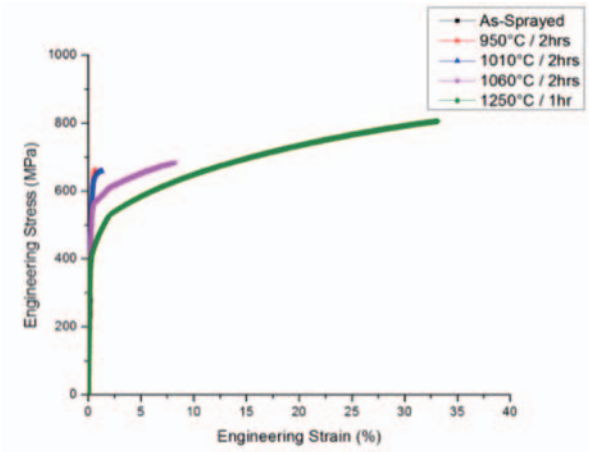


図11　インコネル718皮膜　熱処理後引張り強度

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

図12　オープンラボ風景

6．おわりに

当社では，コールドスプレー法を用いた加工を始め，お客様に実際にコールドスプレー法を体験して頂く為にオープンラボを開設している。図12にプラズマ技研工業のコールドスプレーオープンラボ風景を示す。是非一度，コールドスプレー法を体験して頂けることをお待ちしております。

参考文献

(1) A.Papyrin,et al ” Cold Spray Technology” ：Elsevier Science Ltd, (2007)

(2) 例えば Mark F.Smith,Ronald Dykhuizen et al “Introduction to Cold Spray and New Opportunities It offers” ：ITSC 2002

(3) Wilson Wong, Eric Irissou, Hirotaka Fukanuma,et al “Cold Spray Forming Inconel 718 “ ：ITSC 2012

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

特集：最新のガスタービンにおける修理・補修技術

ガスタービン遮熱コーティングの機械的特性評価技術

脇　　裕之*1
WAKI Hiroyuki

キーワード：遮熱コーティング，機械的特性，評価法，密着強度，強度，弾性係数，損傷メカニズム

1．はじめに

ガスタービン動翼用超合金の寿命に及ぼす各種損傷・劣化要因は，種々あり複雑であるが，その主因は温度に依存し，疲労，硫化腐食，熱疲労，酸化，クリープに大別される[1]。翼の冷却技術と遮熱コーティング（Thermal Barrier Coating：TBC）技術の進歩により，超合金の温度は抑えられ，また耐食・耐酸化コーティング技術が，動翼の寿命向上に重要な役割を果たしていることは周知の事実である。このように，翼，燃焼器などガスタービンの高温部品にとって，遮熱コーティングや耐食・耐酸化コーティングは不可欠な技術となっており，ガスタービンの高効率化，寿命延伸に大きく寄与している。実機への適用という観点からは既にTBCの有効性は十分認識されているが，信頼性に関しては十分とは言えないのも現状である。

TBCの耐久性は，熱疲労，熱衝撃，高温酸化，高温腐食などによって支配され，航空機用か発電用か（運転モードの相違），また使用される部位などによってもその損傷の主因は変わり，損傷機構は複雑である。損傷機構の解明とその機構に立脚した余寿命診断技術の高度化は，安全性向上と経済的観点から重要な課題である。破壊機構の解明や余寿命診断において解析の担う役割は大きいのは言うまでもない。例えば，熱応力解析ではコーティングの力学特性を正確に表現することや，長時間材質劣化（焼結による熱伝導率上昇やヤング率増加など）を反映することなどが解析精度の向上につながる。一方，従来からTBCは材料開発とプロセス開発を主体として進められてきている。TBCの材料面やプロセス面での開発課題は，この耐久性向上ならびに遮熱特性向上（低熱伝導化，厚膜化）と言える。本報で取り上げる特性評価技術と，これら損傷機構の解明や寿命診断技術，材料開発やプロセス開発との関係を図1に示す。これらの開発や高度化に不可欠なものが特性評価技術である。

特性試験方法（耐久性や機械的・熱的性質）に関しては，バルク材料についてはその規格化が早くから進んでいて，それに基づいたデータ蓄積がなされてきた。しかし，コーティングに関しては，バルク材に比べて評価が困難であり，試験方法の規格化およびデータベース化が遅れている。これら特性評価技術の確立が望まれている中，近年，TBCの特性評価法の標準化が推し進められている。本報では標準化されているものを含めて，TBCの機械的性質に関連する評価技術を解説する。

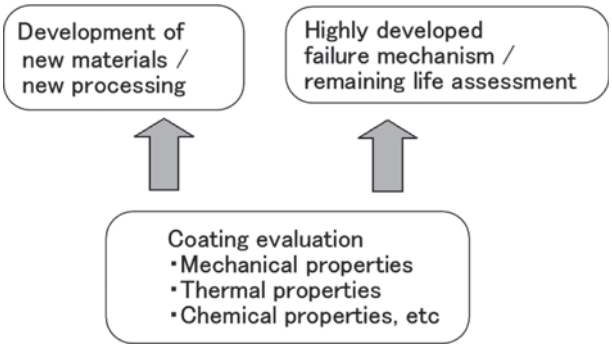


図1　特性評価技術の位置づけ

2．遮熱コーティングの損傷機構

遮熱コーティングシステムの断面組織構造の例を図2に示す。これは大気プラズマ溶射によるTBCシステムである。TBCの開発は，材料や添加物，プロセス（組織構造を含む）などの検討を経て，発電用ガスタービンとしては，大気プラズマ溶射によるイットリア安定化ジルコニア（YSZ）が一般的に使用されている。またセグメンテーション（縦割れ）がコーティングの耐はく離性向上に有効であるため，大気プラズマ溶射による縦割れYSZも実用化されている。起動停止による熱応力の繰返しが損傷の主因となる航空機用エンジンでは，電子ビーム蒸着（EB-PVD）によるイットリア安定化ジルコニアが実用化されており，その柱状組織構造によって熱応力を緩和し，耐久性向上（熱応力緩和）を図っている[1],[2]。

遮熱コーティングと基材の間には，熱応力の緩和や密着性の向上のため，ボンドコートとしてMCrAlY（MはCo and/or Ni）コーティングが施工されている。また，MCrAlYは耐食・耐酸化コーティングも担っている。このボンドコートについては現在，減圧プラズマ溶射や高速フレーム溶射で施工されるのが一般的である[1],[2],[3]。

原稿受付　2012年6月8日
＊1　岩手大学　工学部　機械システム工学科
〒020-8551　盛岡市上田4－3－5

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

MCrAlYはTBCとの界面にアルミナ等の熱成長酸化物（Thermally Grown Oxide: TGO）を生じることにより，基材の腐食を抑制する役割を担っている。一方で，このTGOの成長はTBCのはく離の直接的な原因とも考えられている。

TBCに生じる損傷についてはこれまでにも多数報告されており，その主因に応じて様々な損傷モードがある。機械的な要因を取り上げると，TBC損傷の直接的原因となる応力は，TBCと基材の線膨張ミスマッチに起因する皮膜面内の圧縮応力であることは広く知られており，界面の凹凸に起因して界面き裂が発生する[4]。これは異材であるTGOが界面に成長した場合も同様である。溶射により施工されるTBC/ボンドコート界面は数十μmの凹凸を有している。この凹凸はTBCの結合力増加に寄与していると同時に，先述したように皮膜面内圧縮応力下において局所的に複雑な応力分布を生じる原因となっている。界面の凹凸に起因する局所的な残留応力分布や，TGO成長後の応力分布がFEM解析されTBCのはく離機構が検討されている[5],[6]。

TBCのはく離寿命については，簡便法としてTGOの成長厚さと関連づける考え方がエンジンメーカー各社から報告されている[7]。またTGOの成長量と線膨張ミスマッチひずみの両方を考慮した評価式も提案されている[8]。

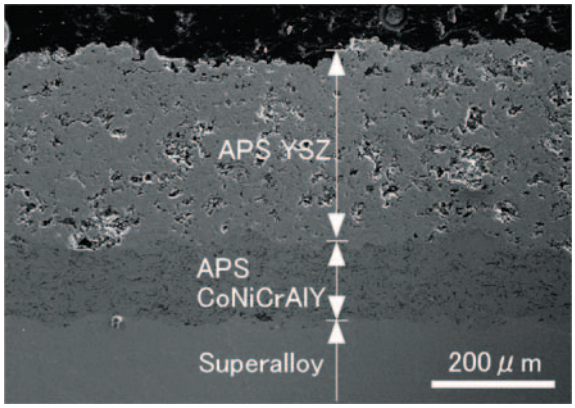


図２　大気プラズマ溶射によるTBCシステムの例

３．コーティングの機械的特性の評価技術

例えばプラズマ溶射による，遮熱コーティングは，溶融させたジルコニア粒子が基材面で急冷凝固し，気孔やき裂を含んだラメラ組織となるため，その機械的性質は非常に複雑となる。このようなプロセス依存以外にも，使用中の熱履歴により特性が変化することになる。熱応力解析を行うには，コーティング自体の特性を正しく把握して，コーティングシステム材としての解析に反映させる必要がある。本報ではコーティングの機械的特性として，余寿命診断や応力解析のデータベースとして重要な，密着強さ，コーティング自体の強度，弾性係数を取り上げる。

3.1　密着強さ評価技術

溶射皮膜の密着強さ試験方法としては，図３に示すように接着材で皮膜表面にジグを接着して，皮膜を垂直に引っ張るJIS H8402「溶射皮膜の引張密着強さ試験方法」が規格化されており，この手法が利用されることが多い。しかしこの方法は，試験片の作製や試験に手間を要する。

現在，日本溶射学会を中心とした「溶射皮膜の界面靱性試験方法に関する標準化事業」によって圧子押し込み法による密着強さ試験法の国際標準の提案[9]にむけ検討が進められている。これはビッカース硬さ試験機を用いて，図４に示すように界面上に圧子を押し込み，界面近傍に発生する半円き裂に対して，界面はく離荷重や，界面破壊靭性値を求めるものである[9],[10],[11]。試験片のサイズが微小で，一つの試験片から多数のデータが採取でき，また実機から切り出した試験片の作製も可能であり有用な方法と考えられる。TBCを始め種々の溶射コーティングに対して，ラウンドロビン試験が進められている。一例として著者らの実験結果，APSによるTBC（YSZ）とAl_2O_3に関して，荷重Pと発生したき裂長さ（c-a）の関係を図５に示す。界面に長さ50μm のき裂が発生する場合をはく離荷重と定義すると，TBC（YSZ）とAl_2O_3のはく離荷重の相違を捉えることができていることが分かる。このように界面にある長さ（例えば50μm）のき裂が発生する荷重をはく離荷重とし，はく離強さのクラス分けが検討されている。

次に，界面破壊靱性値の評価結果の例を図６に示す。これは次式[9],[11]で評価したものである。

$$K_C = \frac{g}{\sqrt{2\pi}} \frac{P}{a\sqrt{c}} \cosh(\pi\varepsilon) \qquad (1)$$

$$\varepsilon = \frac{1}{2\pi} \ln \left(\frac{\dfrac{\kappa_c}{\mu_s} + \dfrac{1}{\mu_c}}{\dfrac{\kappa_s}{\mu_c} + \dfrac{1}{\mu_s}} \right), \quad \kappa_i = \frac{3-\nu_i}{1+\nu_i}$$

ここではνはポアソン比，μは横弾性係数，gは補正係数であり，添字cはコーティング，sは基材またはボンド層を意味する。図のように，ある試験荷重（き裂長さ）以上では，材料固有の安定した界面破壊靱性値が得られている。現在，比較的大荷重を必要とする金属コーティングなどについても検討が推し進められている。

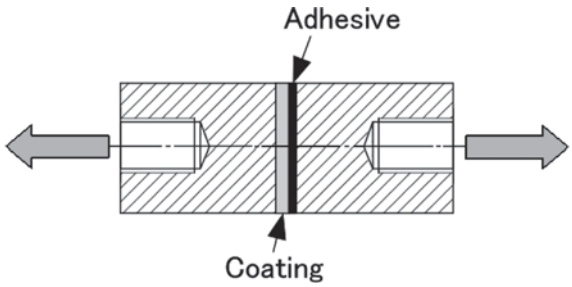


図３　接着材を使った引張密着強さ試験法

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

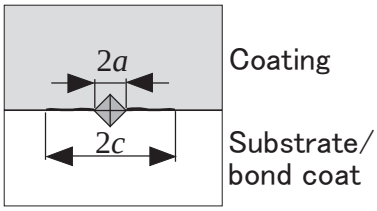


図４　圧子押し込みによる密着強さ試験法

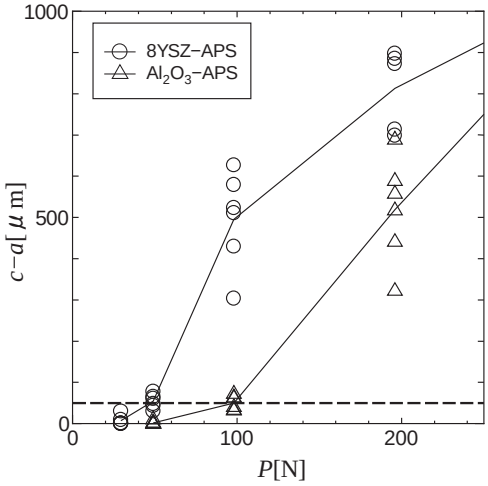


図５　圧子押し込み法によるき裂発生荷重の評価

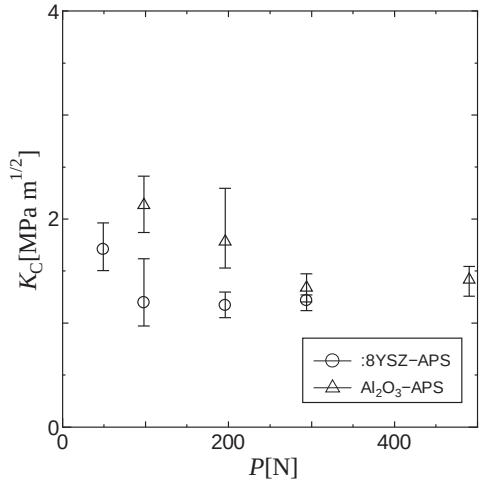


図６　圧子押し込み法による界面靱性値評価

3.2　強度評価技術

遮熱コーティングや耐食・耐酸化コーティングの強度評価の現状は，厚く形成させたコーティングから試験片を切り出し加工し，自立コーティングに対して，曲げ試験[12]が行われることが一般的である。実機の厚さと異なるが，試験は簡便であり最も基本的な手法である。以下に著者らが開発した評価技術を紹介する。特殊な手法であるが，それぞれの利点がある。

3.2.1　複合基材の溶解による円筒の単軸負荷試験

曲げ試験は薄膜やコーティングシステムに対しては合理的な手法である。しかし応力―ひずみ構成式を得るためには，単軸引張・圧縮試験を行う必要がある。特に，コーティングは一般のバルク材と組織構造が大きく異なるため，応力―ひずみ構成式を把握することは重要である。その評価法として図７に示す円筒の単軸負荷試験技術を構築した[13]。通常，コーティング単体試験片を抜き出す場合は板状試験片であるため，残留応力による試験片の反りに注意が必要である。また，コーティング単体の単軸試験は，試験片の非対称性が原因でチャッキングが難しい。本手法の試験片作製方法を図7に示している。軟鋼とステンレスの複合材料を基材とし，コーティング施工後に軟鋼のみを酸で溶解し，チャック部を備えたコーティング単独試験片を得る。軸対称試験片であり，残留応力による反りの心配は無い。また実機で使用される0.3mm程度の膜厚でありながら，円筒状であるため断面２次モーメントが大きく座屈に強い。また断面積を稼ぐことができるため（例えば図７の外径12.7mmの円筒の場合，中実 $\phi = 4$ mmの断面積に相当する），負荷荷重も大きく扱いやすい試験片である。これにより明らかにした耐熱耐食コーティング，遮熱コーティングの非線

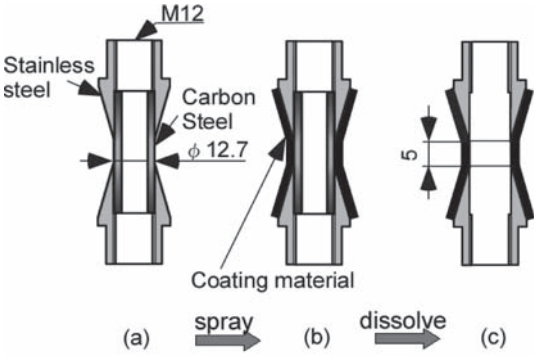


図７　複合基材の溶解による円筒試験片の作製方法

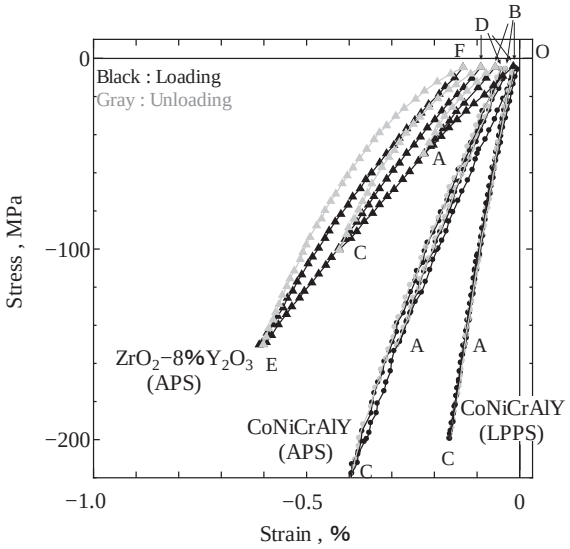


図８　円筒試験片の単軸圧縮による溶射コーティングの非線形圧縮応力―ひずみ応答

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

形応力―ひずみ応答を図８に示す。負荷と除荷で履歴が異なり，コーティング特有の扁平粒子のすべりや空孔の収縮を起因とする非線形挙動を呈していることが分かる。引張強度やヤング率についても報告[13]しているが，試験片の作製に手間を要するデメリットがあり，強度やヤング率を得るのみであれば，曲げによる方法が簡便でよい。

3.2.2　円管の横圧縮試験

円管（円筒）横圧縮法[14],[15]は試験片の作製及び負荷試験が容易である。図９はその試験片の作製方法を示している。円管基材にコーティングを施工し，適切な長さに切断した後に，基材のみを薬品により溶解する。この場合は，軟鋼の基材をコーティングとは反応しない硝酸により溶解した。本計測手法の最大の特徴は，応力の高い順に破壊が４回起こり，１つの試験片から４カ所の曲げ強度を効率的に採取できることである。破壊前の荷重－変位関係からヤング率を評価可能とし，破壊開始後は４カ所の強度を評価可能なモデルを構築した。一例として大気プラズマ溶射APSで作製したCoNiCrAlYの荷重―変位関係を図10に示す。破断前に応力が高いのはA，Bの位置であり，どちらかが先に破断する。次にA，Bの残りの一方が破断する。その後はC，Dの位置の応力が高くどちらかが破断する。最終的にA，B，C，Dの４カ所が破断することになる。ここでA，Bはコーティングの界面側表面，C，Dは外表面であり，表面側と界面側それぞれの強度を別々に評価することも可能である。曲がり梁理論に基づく簡便法である。ヤング率評価についてはその適用範囲をFEM解析で明らかにするとともに，高精度評価のための円管の半径rと肉厚hの比h/rの範囲も示している[14]。

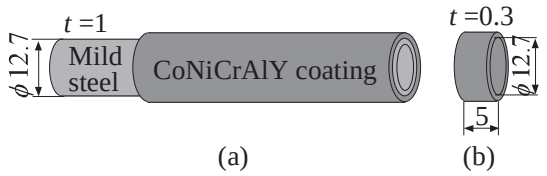


図９　皮膜円管試験片の作製方法

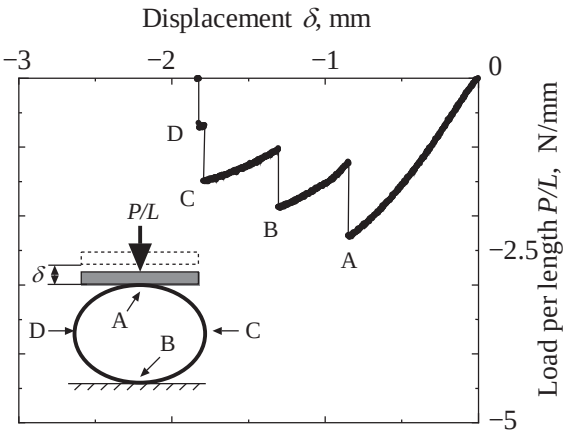


図10　円管横圧縮試験による荷重－たわみ関係

大気プラズマ溶射APS，減圧プラズマ溶射LPPS，高速フレーム溶射HVOFにより作製した，各CoNiCrAlYコーティングの900℃に及ぶ高温強度を図11に示す。また溶射後の熱処理による強度の向上率を示したものを図12に示す。コーティングの組織構造によって向上能力が異なることや，焼結が始まる温度域について明らかにしている。

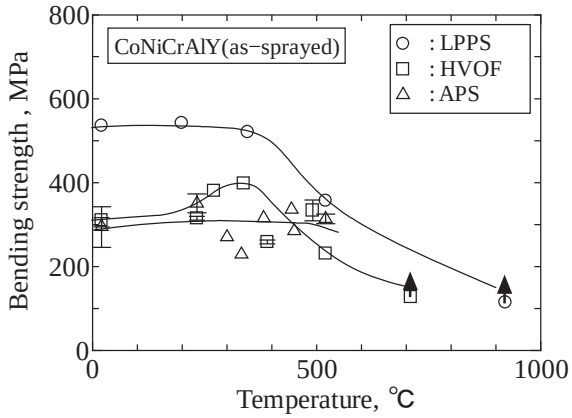


図11　円管横圧縮試験による各種CoNiCrAlYの高温強度評価結果

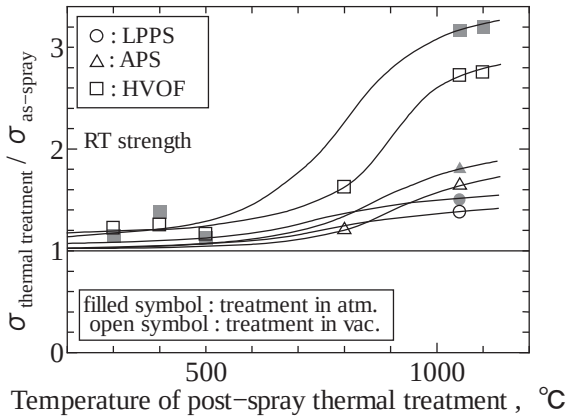


図12　円管横圧縮試験による各種CoNiCrAlYの熱処理による強度上昇評価

3.3　弾性係数評価技術

弾性係数評価法は，1）機械的負荷法，2）共振（共鳴）法，3）超音波パルスエコー法に大別される。さらに皮膜の弾性係数を評価する場合は，a）基材と一体化したまま測定する場合と，b）皮膜単独材に対する測定に分類される。機械的負荷法は，負荷荷重と変形（ひずみ）を測定し，変形抵抗を直接測定する最も基本的な評価法である。圧子を材料表面に押込み，除荷時の荷重－変位勾配を利用する押込み法（インデンテーション法）も機械的測定法の1種と見なせる。共振法は，共振（共鳴）周波数が材料の弾性係数に依存することを利用するものである。超音波パルスエコー法は，材料を伝搬する音速がその材料の弾性係数に依存することを利用するもので

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

ある。それぞれの測定方法で測定する領域（ゲージ長さ）や負荷方向が異なり，TBCの場合，その値は大きく異なることになる。例えば合金コーティングMCrAlYの場合でも，同一の試験片に対して計測した場合でも，パルスエコー法，ナノインデント法，曲げ法，共振法でヤング率の値は２倍以上異なることが報告されている[16]。また異方性の強いAPSコーティングでは，皮膜面内方向か膜厚方向かによってもその値は，約３倍異なっている測定手法もある[16]。一方，遮熱コーティングに関しては，例えばEB-PVD YSZのヤング率の文献値を調査すると計測原理や負荷モードに依存し，その値は1桁以上異なる値が散見される。このような状況で，弾性係数評価法の標準化は重要な課題であった。

3.3.1　組合せ梁の曲げ

ガスタービン耐熱コーティングの特性試験方法の標準化に関しては，世界に先駆けて大阪科学技術センター付属ニューマテリアルセンターにおいて推し進められている。縦弾性係数に関しても，その一環として以下のように標準化された。

試験片作製や試験の簡便性から，基材と一体化したまま遮熱コーティングの縦弾性係数を評価できれば有用である。組合せ梁理論に基づき，図13に示すような基材一体のコーティングシステム試験片の曲げ試験からコーティングの縦弾性係数を評価する手法が標準化されている（「JIS H8454遮熱コーティングの縦弾性係数試験方法，(2010年制定)」）。基材より一桁低いコーティングの縦弾性係数を基材と一体化したまま測定する本方法は，入力値の誤差に敏感である。図13に示す試験片に対して，(1)荷重Pとコーティング側のひずみε_c，(2)Pと基材側のひずみε_s，(3)Pとたわみy_l，(3)ε_cとε_s，に基づく4種類の評価法の測定精度と誤差感度を検討した。図14は典型的なTBCシステムを想定して，計測する荷重－ひずみの勾配，または荷重－たわみの勾配に１％の誤差が生じた場合に，評価されるTBCのヤング率への影響度を示したものである。荷重Pと皮膜ひずみε_cを利用する方法が誤差に最も不敏感である様子が分かる。また横軸の値が小さい場合，すなわちコーティングが基材（ボンド層を含む）と比較して薄い場合に，測定誤差の影響が大きくなる様子が分かる。その他の誤差要因として，溶射コーティングは凹凸が大きいため，膜厚誤差が必ず生じる。これに対しても不敏感である必要があり，これも荷重Pと皮膜ひずみε_cを利用する方法が最も誤差に不敏感であった。同様に各誤差要因に対して検討し，総合的に最も誤差感度の低い荷重Pと皮膜ひずみε_cを利用する方法が標準法として採用されている。APSによるTBCの評価結果例を図15に示す。皮膜の厚さが基材に比較して薄い場合は，誤差に対する感度が高くなるが，ある厚さ比以上では，誤差に不敏感な値が得られる。精度良く評価するために，誤差に不敏感な基材とコーティングの厚さの比の制限範囲も示されている[17]。現在，国際標準ISO提案のために追加のラウンドロビン試験が行われている。

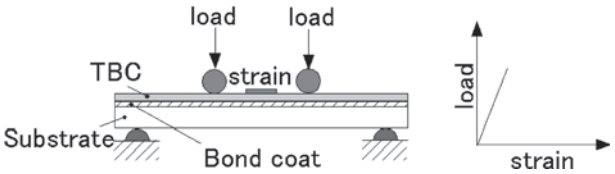


図13　コーティングシステム試験片の４点曲げ試験

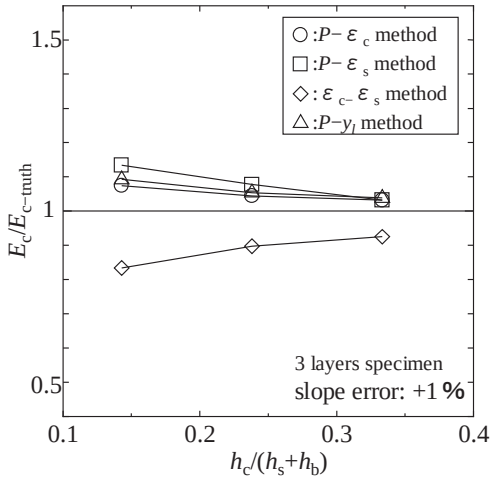


図14　各手法の誤差に対する影響度の比較

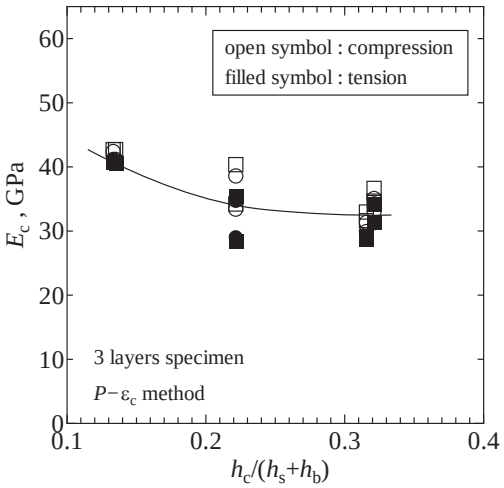


図15　TBCの縦弾性係数の評価例

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

3.3.2　共鳴超音波スペクトロスコピー

一般的な曲げ試験や，曲げ共振法は，面内方向の弾性係数を評価する方法であり，本質的にその他の方向の弾性係数は評価困難である。共鳴超音波スペクトロスコピーは振動のモードを限定せず，自由振動により多数（10数個）の共振周波数を得て，それを満足する全ての方向の弾性係数（E_i，ν_{ij}，G_{ij}）を逆計算で決定する方法である。コーティングは通常面内等方性の弾性を仮定できるため，５つの独立な弾性係数を決定することになる。高温測定では高周波ノイズや延長支持ロッド自体の振動など外乱が多く精度が落ちる。高温下において共振周波数，振動のモードや次数を，誤りなく確実に同定するため，共振時の試験片自体の変位分布を上方から直接計測することにより，高精度に弾性係数を決定可能なシステムを構築した[18]。図16はそのシステムを示している。試験片を３点で支持し，そのうちの１点の圧電振動子で試験片を共振させる。その振動を試験片上面の変位分布としてレーザードップラー振動計LDIで計測する。圧電振動子で加振する周波数をスウィープし，十数個の共振周波数を得る。各周波数での変位分布を計測し振動のモード・次数を把握する。図17はAPSによるTBCの共鳴周波数と振動分布の例を示したものである。コーティング単体の試験片でサイズは約5.2×4.5×1.7mmである。仮定した弾性係数から計算した振動分布と共振周波数が，計測したものと良く一致していることが分かる。このように決定した弾性係数の一例を図18に示す。1100℃下に及ぶ高温下において，遮熱コーティングの弾性係数を計測し，面内方向と膜厚方向の弾性係数の温度依存を明らかにしたものである。図より，このコーティングの場合は，面内方向と膜厚方向のヤング率の異方性が高いことが分かる。また溶射まま材（as-spray）では約800℃を超えるとヤング率が上昇し始め，約1000℃を超えると急にヤング率が上昇することが分かる。その他全方向のポアソン比，全方向のせん断弾性係数も得ている。

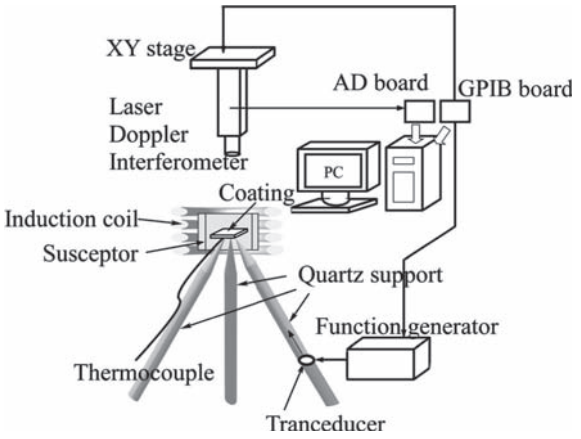


図16　高温共鳴超音波スペクトロスコピー計測システム

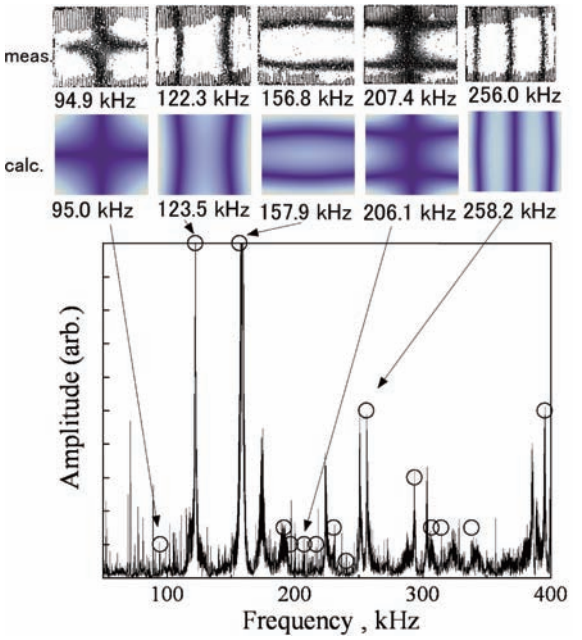


図17　共鳴周波数と振動モード・次数の計測（1100℃）

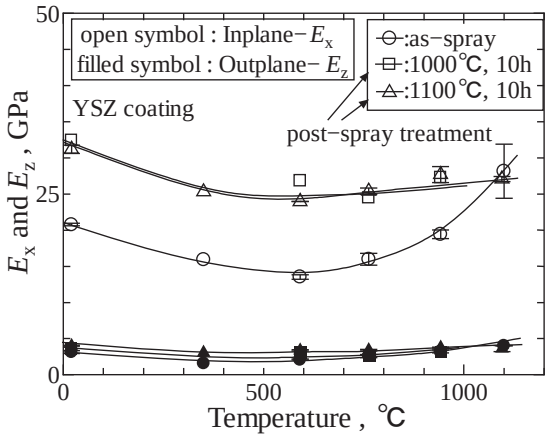


図18　高温下における遮熱コーティングの全方向のヤング率の計測

4．結言

近年，遮熱コーティングの特性試験方法の規格化・標準化による国際競争力強化を目指し，産学官連携により遮熱コーティングの耐久性・機械的特性・熱物性評価の標準化が推し進められ整備されてきた。本報では機械的性質の評価技術を紹介したが，熱物性評価法として，遮熱コーティングの熱伝導率測定方法（JIS H8453）（2010年）および遮熱コーティングの線膨張係数試験方法（JIS H8455）（2010年）も標準化されている。その他に熱サイクルに対する耐久性評価法として，温度傾斜場での耐熱試験方法であるISO 13123（2011年）「Test method of cyclic heating for thermal-barrier coatings under temperature gradient」や，電気炉などを用いた均温加熱での試験方法であるJIS H8451（2008）「遮熱コーティングの耐はく離性試験方法」も標準化されている。このように特性評価方法の標準化が進み，物性のデータベース化，材料やプロセス開発，熱解析，応力解析に基づい

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

たコーティングシステムの設計技術の高度化，余寿命解析技術の高度化などが加速することが期待される。

参考文献

(1) 伊藤義康，吉葉正行，機械の研究，57-8（2005-8），p.864-871
(2) 児島慶享，日本ガスタービン学会誌，38-2（2010-3），p.85-90
(3) Feuerstein, A., Knapp, J., Taylor, T., Ashary, A., Bolcabage, A., Hitchman, N., J. of Thermal Spray Technology, 2008, 17-2, p.199-213
(4) 伊藤義康，日本機械学会論文集A，76-767（2010-7），p.784-793
(5) Chang, G.C., Phucharoen, W., Miller, R.A, Surface and Coatings Technology, 30（1987），p.13-28
(6) 松崎祐司，川村昌志，日本ガスタービン学会誌，30-6（2002-11），p.497-502
(7) Strangman, T.E., Thin Solid Films, 127（1985），p.93-106
(8) Miller, R.A., J. of American Ceramic Society, 67-8（1984），p.517-521
(9) 山崎泰広，久我慎一郎，袖岡賢，藤田和宏，渡邊誠，黒田聖治，日本溶射学会第94回全国講演大会講演論文集，（2011-11），p.3-4
(10) 山崎泰広，久我慎一郎，溶射，47-3（2010-7），p.106-111
(11) 荒井正行，材料，58-11（2009-11），p.917-923
(12) 伊藤義康，斉藤正弘，宮崎松生，本多啓三，材料，43-489,（1994-6），p.690-695
(13) Waki, H., Ogura, K., Nishikawa, I., Ohmori, A., Materials Science and Engineering A, 374（2004），p. 129-136.
(14) 脇　裕之，廣田裕也，小林明，日本機械学会論文集A，74-746（2008-10），p.1342-1350
(15) Waki, H., Kitamura, T., Kobayashi, A., Journal of Thermal Spray Technology, 18-4（2009-12），p.500-509
(16) Margadant, N., Neuenschwander, J., Stauss, S., Kaps, H., Kulkarni, A., Matejicek, J., Rossler, G., Surface and Coatings Technology, 200（2006），p.2805-2820
(17) Waki, H., Fujioka, H., Harada, Y., Okazaki, M., Kawasaki, A., Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering, 4-2（2010-2），p.274-284
(18) 脇　裕之，久保智史，荻　博次，小林　明，日本機械学会論文集A，76-762（2010-2），p.151-157

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

I Mech E 第10回 ターボチャージャ国際会議の参加報告

宮下　和也*1
MIYASHITA Kazuya

1．はじめに

I Mech E（英国機械学会）主催の第10回ターボチャージャ国際会議が５月15，16の両日，オリンピックを２か月後に控えたロンドンにて開催された。

この会議はターボチャージャおよびターボ過給エンジン技術に特定して1978年の第１回以来４年毎に開催されてきたが，第10回となる今回は前回（2010年）から２年を経ての開催となった。過給機と過給エンジン技術の進歩に貢献してきた貴重な国際会議であるが，ヨーロッパを中心に増々強まるターボ車ニーズと技術展開を反映して２年後の開催となったものである。

ターボ過給は地球環境を守るうえで自動車が果たすべき排ガス浄化と燃費改善の分野で大きな役割を果たしてきた。特にヨーロッパを中心にディーゼル車だけでなくガソリン車のダウンサイジング化にも貢献しつつある。

この様な社会的背景の中で，ターボチャージャのワイドレンジ化，長寿命化などのニーズに対し，可変ノズル（VG）ターボや２段過給，疲労強度解析など様々な研究開発が展開されている。今回の会議もその様な状況下で，世界の各社・各研究機関より最新技術の発表が行われた。

2．参加者の傾向

ターボチャージャの生産量は2009年のリーマンショックで一時的停滞はあったが，自動車産業の回復に伴って増加をつづけ2010年には非公式ながら全世界で2000万台を超えたと推測される。

それを反映して基調講演２件，技術講演32件を数えたが，欧米を中心に企業と大学･研究機関の共同研究の発表が多いのも特徴であった。とは言え，国際会議としては元々ターボチャージャ関連に限定された分野のため小規模の会議である。

会場はサボイプレースに位置する英国電気学会本部会館で19カ国，235名余が参加して行なわれた。参加者の内訳は，配布名簿によると表１に示すとおりであるが，筆者の記憶では新記録と思われる。英国は地元であり参加人数，発表件数ともに極めて多いが，ドイツ，米国，日本からも20名以上が参加した。日本から20名の参加はこれも新記録と言える。

表１　主な国別参加人数（過去４回の推移）

開催年		2012	2010	2006	2002
ヨーロッパ	英　国	111	96	73	77
	ドイツ	38	32	19	25
	フランス	5	7	14	4
	スエーデン	8	8	12	6
	スイス	6	3	11	12
	イタリア	4	2	2	2
	オランダ	1	3	0	9
米国		23	11	10	9
ブラジル		3	2	−	−
日本		20	9	5	2
合　計		235+α	180	149	152

（注）2012年は参加者名簿に数名（α）の欠落あり

会社（グループ）別では，ヨーロッパが本拠のBWTSの28名が突出していたが，カミンズ15名，ハネウェル，三菱グループ各10名，ＩＨＩグループ６名で，自動車メーカーも多かった。大学・研究機関も企業との共同発表件数の増加を反映して40名近くにのぼった。

3．講演発表の概要

講演は表２に示す順序で両日とも基調講演で始まり，実質10セッション・32件の技術発表で構成された。

二つの基調講演は夫々乗用車，商用車の過給エンジンの現状と将来動向に関するもので，EURO6の排ガス対策後はCO_2削減に重点がおかれ，燃費改善のための様々な過給技術，排熱回収システムが紹介された。欧米でもHV，EVが注目されているが，ICE（内燃エンジン）とは距離，用途で使い分けされると言う認識は日本と同様である。

セッション１の２件は新奇過給システムの紹介で排ガス発電のため２段過給やエンジン背圧低減のため排気吸引方式が提案された。

セッション２からは空力性能系（2A）と機械強度系（2B）に分かれ，筆者はB系列を聴講したのでA系列については前刷集より紹介する。2Aでは機械過給を含む２段，３段過給，２台並列過給など多様な過給システムが，2Bではエキマニ一体型タービンハウジングの3D熱疲労解析，オフハイウェイ用コンプレッサインペラの低サイクル疲労解析の簡略化手法が紹介された。

セッション3Aはコンプレッサ空力設計関連で可変トリム，インペラ形状最適化，非定常流性能が，3Bは振動関連で軸受特性とロータ動特性の関係，FEMによる

原稿受付　2012年５月28日
＊1　元 ＩＨＩ過給機設計部
現 宮下技術士事務所
〒261-0003　千葉市美浜区高浜４-10-17-102

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

表２　講演セッション

一日目	Keynote講演：先進過給システムとダウンサイジング乗用車エンジンの現状と将来	
	Session 1：新規アプリケーション（２件）	
	Session 2A：（３件） 高過給および２段過給	Session 2B：（３件） 熱疲労および 低サイクル疲労
	Session 3A：（３件） コンプレッサ空力設計（CFD）	Session 3B：（３件） ロータ振動および タービン翼振動
	Session 4A：（３件） 先進シミュレーション および評価	Session 4B：（３件） タービン開発
	夜：テームズ川ディナークルーズ	
二日目	Keynote講演：先進過給システムとダウンサイジング商用車エンジンの現状と将来	
	Session 5：（３件）過給システムおよび過渡応答	
	Session 6：（３件）コンプレッサ開発	
	Session 7：（３件）新奇過給および高効率システム	
	Session 8：（３件）タービン非定常流	

二重油膜支持ロータの振動解析，光レーザ計測によるタービン翼ミスチューン振動が紹介された。

セッション4Aはターボチャージャ実用条件下の特性，即ちタービン放熱の影響，エンジンマッチング性能，脈動流下のコンプレッサ性能が紹介された。4Bはタービン関連で可変ノズル駆動機構の電気式・機械式の比較，可変ノズル両端隙間の影響比較，ランキンサイクルによるタービン排熱回収が紹介された。

以上で初日の講演が終り，夜はテームズ川のディナークルーズというユニークな企画の宴が催された。

２日目は上述の基調講演のあと統一セッションとなり，セッション５では各種ターボコンパウンド方式の比較，ダウンサイジング過給ガソリンエンジンの低圧排熱回収タービンの開発，ボールベアリングと小径軸流タービンの組合せによる高応答ターボの開発が紹介された。

セッション６では小径２段コンプレッサ･リターンチャンネル，羽根なしディフューザの隙間･幅の影響，インペラ入口抽気スロット位置の影響などコンプレッサ性能の研究が紹介された。

セッション７では両吸込みコンプレッサ，低速域で高効率の前傾Claw型前置ブースタ，舶用可変ノズル式ハイブリッドターボなど新奇過給機が紹介された。

セッション８はタービン非定常流に関する研究で曲り管後の流れ，二重スクロールタービンの流れ，タービン前後の流れ比較が紹介された。３件ともパルス発生器による脈動流タービン単体性能で，20数年前の小西･吉識の研究[1]などと類似性が感じられるが，CFD解析との比較，可視化が目新しいと言えようか。

以上32件のほか口頭発表は無かったが，ラジアルタービン，コンプレッサの空力研究２件が論文集に含まれている。

写真１ 会場の電気学会建物（右はファラデーの銅像）

写真２　会場近景（ウォータールー橋より上流を望む）

４．むすび

私ごとだが，2003年に定年退職でターボチャージャの開発から離れて９年余りが過ぎた。その後，ターボおよび過給技術の進展は目覚ましく，I Mech E主催の本会議は最新技術動向を知るのに絶好の機会である。有難いことに退職者には学生と同じく参加費50％割引の優遇処置がある。お蔭でターボ技術の進化に興味が尽きない筆者は退職後毎回参加の機会を得ることができた。

進歩しつづける過給技術の世界的動向を実感するとともに，今や34年の歴史を刻んだ国際会議として，ターボチャージャ分野では最も権威ある技術交流の場であると改めて確信した。それ故，過去にターボチャージャ開発に携わった一人として，この会議の増々の発展を期待するとともに，日本の若手技術者各位にも大いに関心を持って欲しいと思う。その願いから，会議の概要を紹介するためGTSJ会誌に報告の機会をいただいた。編集委員会のご配慮に厚く感謝を申し上げたい。

５．参考文献

(1) 小西，吉識“過給機駆動用ラジアル排気タービンの非定常特性に関する研究（第１～６報）”生産研究（1990.2～1991.9）

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

資　料

2011年ガスタービン及び過給機生産統計

ガスタービン統計作成委員会

ガスタービン統計作成委員会は，関係各社の協力を得て2011年１月から12月の間（今年）におけるガスタービン及び過給機の生産状況を調査・集計し，生産統計資料を作成した。資料提供を，陸舶用ガスタービンは15社，航空用ガスタービンは３社，過給機は９社に依頼し，提供を受けた範囲で生産統計資料を纏めた。なお，過給機はすべて排気タービン方式のターボチャージャーであり，機械駆動によるものではない。

Ⅰ．概要

１．2011年陸舶用ガスタービン生産統計概要※

⑴　生産台数および出力（図１，表１）をみると，台数では前年の333台に対し318台と，前年に比べて15台（５％）の減少となり，最近６年間（2006～2011年）では最少となった。出力区分別の前年との比較では，小型・中型がそれぞれ10台ずつの減少となり，大型が５台増加となった。また，出力では前年の2,491MWに対し5,758MWと，前年から3,267MW（131%）の増加となった。最近６年間では最も少なかった前年から一転して，今年は大幅な増加となり，最近６年間では２番目に多い水準となった。出力区分別の前年との比較では，小型が３MWの減少，中型が69MWの増加，大型が3,201MWの増加となっている。

ア）小型（735kW以下）は前年と比べて，台数は９％，出力は６％の減で，それぞれ103台，42MWとなった。

イ）中型（736～22,064kW）は前年と比べて，台数は５％減，出力は14％増で，それぞれ185台，560MWとなった。

ウ）大型（22,065kW以上）は前年と比べて，台数は20%，出力は164%の増で，それぞれ30台，5,156MWとなり，特に出力が大幅な増加となった。

⑵　用途別（表１，図２，図３）にみると，ベースロード発電用（BL），非常用発電用（EM），艦艇用（MM）およびその他（MC）の用途向けで占められており，例年実績がみられるピークロード発電用（PL）が2011年は０台であった。台数で最も多いのは非常用発電用の236台（74％），出力で最も多いのはベースロード発電用の5,307MW（92％）である。前年と比べると，非常用発電用（EM）における台数の減少やベースロード発電用（BL）における出力の大幅な増加による占有率の変動はあるものの，全体的な構成はピークロード発電用（PL）の不在を除けば，例年と変わっていない。

ア）非常用発電用（EM）は前年と比べて，台数は26台（９％）減の236台，出力では24MW（６％）減の363MWとなった。出力区分別にみると，小型は台数で２％の減少，出力で５％の増加，中型は台数で14％，出力で８％の減少となっている。前年は，小型・中型ともに台数・出力が減少したが，今年は，小型は台数が微減で出力は増加，中型は台数・出力ともに減少となっている。

イ）ベースロード発電用（BL）は前年と比べて，台数は18台（45%）増の58台，出力では3,282MW（162%）増の5,307MWと，台数・出力とも大幅な増加となった。出力区分別にみると，小型は台数は変わらず出力で26%の減少，中型は台数で108%，出力で117%の増加，大型は台数で20%，出力で164%の増加となっている。前年は小型から大型まで台数・出力ともに減少し，特に大型の減少が顕著であったが，今年は小型の増加はないものの，中型・大型が台数・出力ともに大幅に増加している。このベースロード発電用の大型の出力増加（3,201MW増）が全体の出力増加（3,267MW増）のほとんどを占めている（98%）。１台あたりの出力を前年と比べると，小型：前年 415kW/台　今年 309kW/台，中型：前年 5.8MW/台　今年 6.0MW/台，大型：前年 78MW/台　今年 172MW/台となっており，大型の大出力化が目立っている。

ウ）艦艇用（MM）は前年と比べて，台数は１台（25%）増の５台，出力は12MW（21%）増の70MWとなっている。

エ）その他用途向け（MC）は前年と比べて，台数は６台（24%）減の19台，出力では４MW（26%）増の18MWとなっている。

オ）ピークロード発電用（PL）は2011年の実績はなかった。

⑶　燃料別（表２，図４，図５）にみると，台数ではガス燃料が前年比33%増の53台，液体燃料が前年比10%減の265台となっている。出力ではガス燃料が前年比161%増の5,295MW，液体燃料がほぼ変わらず

※文中の前年との差異や増加率などの出力に関する数値は，後に示す数表に基づきkW単位で算出している。

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

の464MWとなっている。ガス燃料は前年に比べて台数・出力ともに増加しており，特に出力が大幅増となっている。液体燃料は台数が減少しているものの，出力は前年とほぼ変わっていない。構成比率は，台数ではガス燃料が全体の17%に対し，液体燃料が83％で，前年に比べるとガス燃料の構成比が５％ほど高くなっている。一方，出力ではガス燃料が92%，液体燃料が８％で，こちらも前年に比べて，ガス燃料の構成比が11%ほど高くなっている。

ア）液体燃料では，台数・出力ともに最も多いのが重油１種であり，台数は169台で燃料全体の53％を占め，出力は254MWで燃料全体の４％を占めている。重油１種は前年に比べて台数は13%の減少，出力は２％の増加となっている。次に台数が多いのは軽油の56台で，前年に比べると６％増となっている。最も少ない灯油は40台で，前年比13%減となっている。出力では軽油が145MW，灯油が65MWとなっており，前年と比べると，軽油が11%増加し，灯油は23%の減少となっている。前々年は軽油よりも灯油の方が台数・出力ともに多かったのが，前年は逆転し，この傾向は今年も続いており，さらにその差が開いている。

イ）ガス燃料では，台数が最も多いのは天然ガスの37台で，燃料全体の12％を占めている。出力も天然ガスが最も多く3,739MWで全体の65％を占めている。台数で次に多いのは都市ガスの9台，以下は液化天然ガスの６台，高炉ガスの１台となっている。出力で次に多いのは液化天然ガスの1,373MW，以下は都市ガスの93MW，高炉ガスの89MWと続く。天然ガスが台数・出力ともに最も多い傾向は例年通りである。

ウ）燃料別比率を出力区分別にみると，台数の上位３種は，小型は重油１種（55%），軽油（22%），灯油（19％）（前年から軽油と灯油が逆転），中型は重油１種（61%），軽油（18%），灯油（11%）（構成比率は前年から大きく変わらず），大型は天然ガス（77%），液化天然ガス（17%），都市ガスおよび高炉ガス（各３％）となっている。全体では重油１種（53%），軽油（18%），灯油（13%）の割合になった。出力でみると，小型は重油１種（61%），軽油（20%），灯油（16％），中型は重油１種（41%），軽油（24%），天然ガス（20%），大型では天然ガス（70%），液化天然ガス（27%），高炉ガス（２％）となっている。全体では天然ガス（65%），液化天然ガス（24%），重油１種（４％）の割合となった。前年は天然ガスが出力全体の73%を占めていたが，今年は大型の液化天然ガスの増加により，若干比率を落としている。

⑷　納入地域別（表３）でみると，台数では国内が前年比18台減の281台，輸出が３台増の37台となった。出力では国内が前年比1,782MW増の2,605MW，輸出が1,485MW増の3,153MWとなっている。

ア）国内向けは総台数の88%，全出力の45%を占めており，全体に占める割合は，台数で２％減，出力で12%増と，台数では微減したものの出力では増加している。前年との比較では台数は６％減，出力は217%増の大幅な増加（前年：823MW → 今年：2,605MW）となっている。出力区分別の台数・出力は，小型で８台減，2MW減，中型で15台減，24MW増，大型で５台増，1,761MW増となっている。特に出力における大型の増加（前年比６倍弱）が顕著である。また，小型の台数・出力の減少と中型の台数減・出力増の傾向は前年と同様である。さらに国内の地域別にみると，台数で大きな変化があったのは中部で８台の増加，中国で12台の減少で，出力については関東で1,500MW，近畿で259MW，中国で151MWの増加である。関東，近畿，中国における出力の増加は，事業用の大型機種によるものである。なお，中部は前年は全出力区分で台数・出力ともに減少していたが，今年は小型・中型は台数・出力ともに増加している。地域別のシェアは台数・出力ともに関東が最も多く，それぞれ国内全体の47%，67%を占めており，この傾向は前年と同じである。また，今年は舶用補機向けが前年から４台，19MWの増加となっている。

イ）輸出は総台数の12％，全出力の55%であり，前年と比べた全体に占める割合は台数で２％増，出力では12%減となっている。前年よりそれぞれ３台（９％），1,485MW（89%）増加しており，国内同様，出力で大幅な増加となっている。前々年から前年にかけては輸出の出力の大幅減（5,866MW減）がみられたが，今年は一転して増加となっている。前年との比較を出力区分別でみると，小型は実績がなく２台減，1MW減，中型は５台増，45MW増，大型は台数は変わらず，1,441MWの増加となっており，小型以外は台数・出力ともに前年以上となっている。輸出先別にみると，台数ではアジア（51%），旧ソ連（22%），欧州（16%）の順になっており，出力ではアジア（45%），欧州（31%），中東（19%）となっている。台数・出力ともにアジア向けが最も多くなっているのは例年どおりである。アジア向けは前年と比べて台数は５台（36%）増，出力は777MW（118%）増となっており，特に大型の台数・出力の増加（４台，731MW）が影響している。大きな変動があった地域は，北米における２台，507MWの減少，旧ソ連における７台，145MWの増加，アフリカにおける４台，116MWの減少などである。旧ソ連向けが２番目に台数が多くなっている（８台）のは例年にない傾向である。

⑸　被駆動機械別（表４，図６，図７）では，これまでと同様に，台数・出力とも発電機がほとんどを占

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

め，台数で93%，出力で98％であった。発電機について出力区分別にみると，台数では前年に比べて小型・中型で減少，大型で増加となっており，出力では前年に比べて全ての出力区分で増加している。それぞれの前年比は，台数では小型が２％，中型が７％の減少，大型が20%の増加である。出力では小型が４％，中型が11%，大型が164%の増加となっている。水ポンプは全体で前年に比べて６台減少したものの，4MWの増加となっており，出力区分別にみると，小型は８台，4MWの減少，中型が２台，8MWの増加となっている。この他の被駆動機械では推進機が５台，70MWの実績があった。

⑹ 出力区分別（表５）にその内訳を前年と比べると，小型は，全体で台数・出力ともに減少し，出力帯別（０～146kW，147～367kW，368～735kW）にみても，すべての出力帯で台数・出力ともに減少している。中型は全体で台数は減少，出力は増加し，出力帯別では736～4,412kWは台数減，出力増となったが，4,412～10,296kW，10,297～16,180kW，16,181～22,064kWではいずれも台数・出力ともに増加している。大型は全体では台数・出力ともに増加し，出力帯別では22,065～44,129kWは台数・出力ともに減少したものの，44,130kW以上で台数・出力ともに増加している。特に44,130kW以上が台数で前年比166%，出力で前年比236%の増加となっている。台数の多い順では，736～4,412kW，368～735kW，147～367kWとなっており，これは前年の傾向と変わらない。また出力の多い順では44,130kW以上，736～4,412kW，22,065～44,129kWとなっており，前年から２番目と３番目の順位が入れ替わっている

⑺ 発電用ガスタービン（表６）の台数と出力を前年と比較すると，事業用は，国内では10台，2,029MWとなり，前年比は台数で6台増，出力で1,792MW増となった。輸出では２台，89MWとなり，前年比は台数増減なし，出力で35MW増となった。自家用は，国内が250台，488MWとなり，前年比は台数で22台減，出力で58MW減となった。輸出は35台，3,064MWとなり，前年比は台数で６台増，出力で1,483MW増であった。国内事業用で大幅な増加があった一方で，国内自家用は台数・出力ともに減少している。また，輸出自家用は台数・出力ともに増加した。

⑻ 陸舶用ガスタービン向けモジュールは，2010年に引き続き2011年も実績がなかった。

⑼ 今回の生産統計における国内大型出力の増加の要因の一つに，東日本大震災とそれに伴う電力不足への対応が挙げられる。また，来年（2012年）以降の生産統計において，小型・中型でもその影響が表れてくるものと思われる。

２．2011年航空用ガスタービン生産統計概要

⑴ ターボジェット／ターボファン・エンジン（表７，図８）の新規製造状況については，TJM3はデータを収集出来ず，本年で新規製造を終了予定であるF-2用のターボファンF110，および，前年から新規製造が始まったP-1用のF7で，合計台数は10台，合計推力は646kNであった。

⑵ ターボシャフト／ターボプロップ・エンジン（表８，図９）の新規製造状況については，前年同様にターボプロップ・エンジンの新規製造は無く，ターボシャフト・エンジンではT53およびT-62Tのデータは収集出来ず，SH60J/KおよびUH60J/JA用のT700，MCH-101およびCH-101用のRTM322ならびにOH-1用のTS1で，合計台数は16台，合計出力は21,675kWであった。

⑶ 2007年から加わった民間航空機用エンジン向けモジュール（図10）の新規製造状況については，PW6000の燃焼機モジュールはデータを収集出来ず，A320等用V2500のファンモジュール，CF34の低圧タービンモジュールに，前年からB787用Trent1000の中圧圧縮機（IPC）モジュールおよび燃焼器モジュール，本年からB787，B747-8用GEnXの低圧タービンモジュールが加わり，合計台数は1,289台であった。（図４参照）

⑷ 日本の航空用ガスタービン生産全体の動向としては，防衛省向けエンジンの新規製造の減少傾向が続いているが，民間航空機用エンジン向けモジュールの新規製造ではV2500およびCF34用モジュール台数の回復傾向が続き，Trent1000およびGEnXといった新機種用モジュールの量産が始まって，増加傾向が続く見通しである。民間航空機用エンジン向けモジュールに関しては，2007年以降，V2500およびCF34のモジュール生産統計を掲載しているが，部品製造も含めるとGE90，PW2000/4000/6000，GP7200，Trent500/700/800/900，BR710/715など多機種に渡り，その生産規模も相当な額に達しているが，今後さらにTrent1000，GEnX，PW1000G等の新機種用モジュール製造，部品製造が本格化するため，民間航空機用エンジン関連の占める割合が増加する傾向は続くと見られる。（出典：社団法人日本航空宇宙工業会「平成24年版　日本の航空宇宙工業」，ISSN 0910-1527）

３．2011年過給機生産統計概要

⑴ 生産台数（表９）については，主に自動車向けに使用される圧縮機翼車外径100mm以下のClass１過給機の生産台数は前年比2.6%の増加で約354万台とほぼ横ばいで推移したが，主に建設機械，陸上発電設備，船舶補機等向けに使用される圧縮機翼車外径101mm～200mmのClass２過給機の生産台数は前年比21.1%の

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

増加で約4.5万台となった。主に船舶主機向けに使用される圧縮機翼車外径201mm以上のClass 3 以上の過給機についてはClassごとの程度差はあるものの，総じて22.1％増加で約1.7千台となった。

⑵　生産型式数（表10, 図11）は数年間に渡って生産実績が無い11型式が廃止となったものの，新規に12型式が登録されたため，前年より１型式増加の181型式（全Class含む）となった。但し2008年以降Class 1 の主要過給機メーカー１社の報告を得られておらず，集計上型式数は減少している。

⑶　市場動向としては，不況からの脱却傾向が見られた2010年比で生産台数全体では2.8％の微増となり，継続的な市場回復が見られた。このうち生産台数の多い自動車業界向けのClass 1 はほぼ横ばいの+2.6%の増加であったが，主に建設機械向けとされるClass 2 は21.1%増となり，リーマン・ショック直前の2008年度を上回る結果となった。Class 1 に関しては，円高による為替差損対策等の理由で各社が海外生産化を進めたことにより，国内生産分の伸びが低く推移している可能性がある。また主に船舶主機向けとされるClass 3 以上についてはClassにより異なるものの，総じて22.1%増となり，減産傾向であった2010年と比べて回復傾向が確認出来る。ただしこれらは震災の復興需要による影響も含まれていると考えられる。また造船業界においては円高や中国メーカーの台頭，海運市場の低迷による船舶供給過多や燃料費の高騰等の市場背景があるため，今後も低迷した状態が続くと考えられる。

⑷　製品ラインアップについては，大手メーカーが生産実績の殆ど無い11型式を廃止としたものの，排ガス規制や高圧力比を実現する新機種が，車両用過給機としてClass 1 に２型式，船舶主機，補機用としてClass 2，３，４，６，７，８に10型式追加された。排ガス規制，低燃費化の要求により過給機の需要は今後も増加していくと考えられるが，製品ラインアップに関しては，機種の絞込み等もあり，動向の予想が難しい。

Ⅱ．統計

１．陸舶用ガスタービン

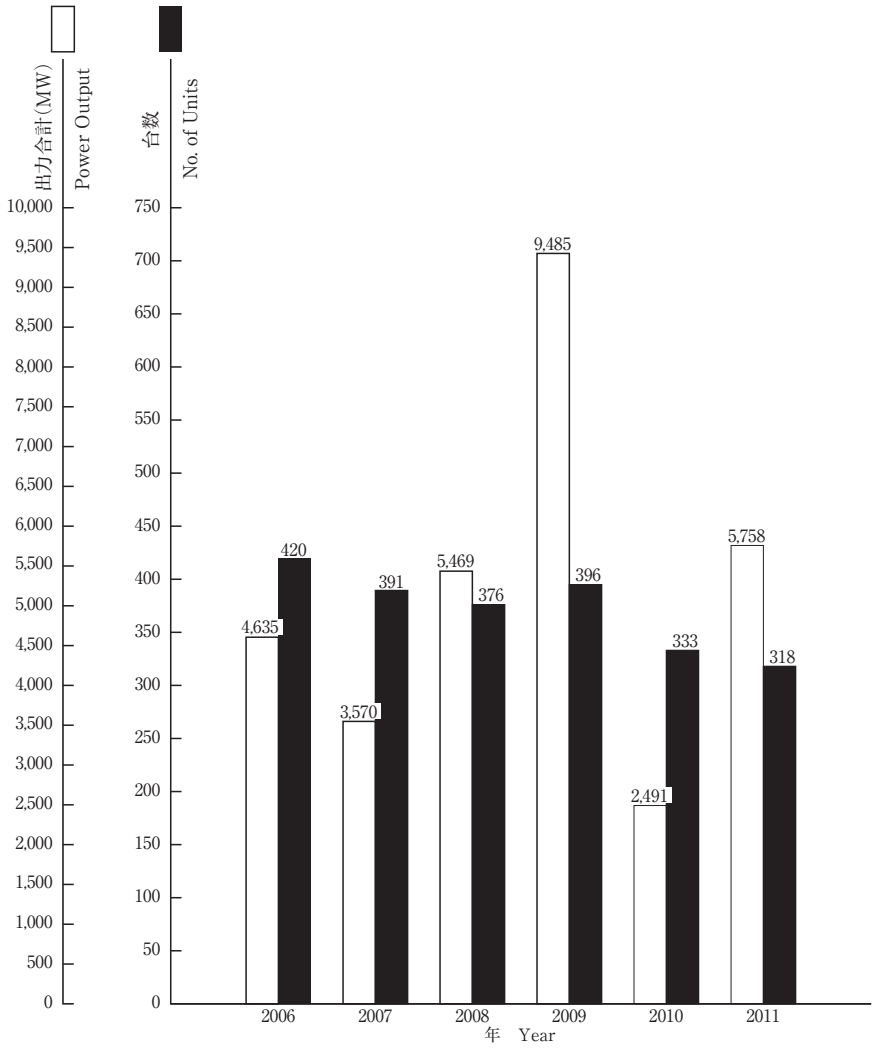


図１　陸舶用ガスタービン

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

表１　2011年用途別生産台数及び出力（kW）

区分　Size		小型　Small Unit ～735kW		中型　Medium Unit 736～22,064kW		大型　Large Unit 22,065kW～		全　出　力 Total	
用　途 Application	コード Code	台数 Units	出　力 Output(kW)	台数 Units	出　力 Output(kW)	台数 Units	出　力 Output(kW)	台数 Units	出　力 Output(kW)
ベースロード発電用 Generator Drive for Base Load	BL	3	927	25	150,625	30	5,155,920	58	5,307,472
ピークロード発電用 Generator Drive for Peak Load	PL	0	0	0	0	0	0	0	0
非常用発電用 Generator Drive for Emergency	EM	90	39,553	146	323,156	0	0	236	362,709
商　船　用 Merchant Marine	M	0	0	0	0	0	0	0	0
艦　艇　用 Military Marine	MM	0	0	5	70,144	0	0	5	70,144
石油化学プロセス用 Oil Refinery and Chemical Process	OR	0	0	0	0	0	0	0	0
その他のプロセス用 Miscellaneous Chemical Process	PR	0	0	0	0	0	0	0	0
実　験　用 Experimental	XP	0	0	0	0	0	0	0	0
空　調　用 Air Conditioning	ACD	0	0	0	0	0	0	0	0
そ　の　他 Miscellaneous	MC	10	2,004	9	15,989	0	0	19	17,993
合　計 Total		103	42,484	185	559,914	30	5,155,920	318	5,758,318

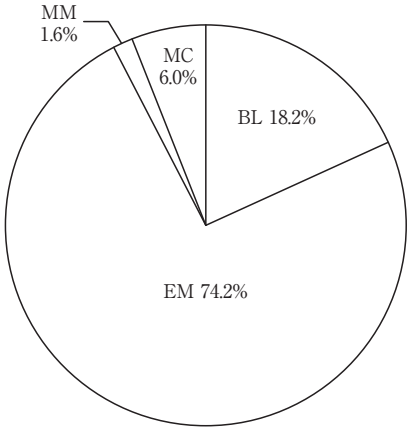


図２　2011年用途別生産台数割合（%）

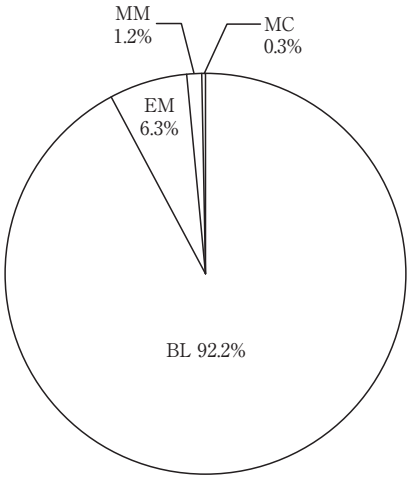


図３　2011年用途別出力割合（%）

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

表２　2011年燃料別生産台数及び出力（kW）

区分　Size			小型　Small Unit ～735kW		中型　Medium Unit 736～22,064kW		大型　Large Unit 22,065kW～		全　出　力 Total	
燃料種類 Kind of Fuel		コード Code	台数 Units	出　力 Output(kW)	台数 Units	出　力 Output(kW)	台数 Units	出　力 Output(kW)	台数 Units	出　力 Output(kW)
ガス燃料 Gaseous Fuel	液化天然ガス Liquefied Natural Gas	LNG	0	0	1	5,250	5	1,368,210	6	1,373,460
	天然ガス Natural Gas	GNG	0	0	14	114,260	23	3,624,950	37	3,739,210
	高炉ガス Blast Furnace Gas	GBF	0	0	0	0	1	88,900	1	88,900
	都市ガス Town Gas	GTW	3	927	5	18,315	1	73,860	9	93,102
	ガス燃料　小計 Sub Total		3	927	20	137,825	30	5,155,920	53	5,294,672
液体燃料 Liquid Fuel	灯油 Kerosene	T	20	6,971	20	57,600	0	0	40	64,571
	軽油 Gas Oil	K	23	8,524	33	136,144	0	0	56	144,668
	重油１種 Heavy Oil No.1	H1	57	26,062	112	228,345	0	0	169	254,407
	液体燃料　小計 Sub Total		100	41,557	165	422,089	0	0	265	463,646
その他 Miscellaneous Fuel		MF	0	0	0	0	0	0	0	0
合　計 Total			103	42,484	185	559,914	30	5,155,920	318	5,758,318

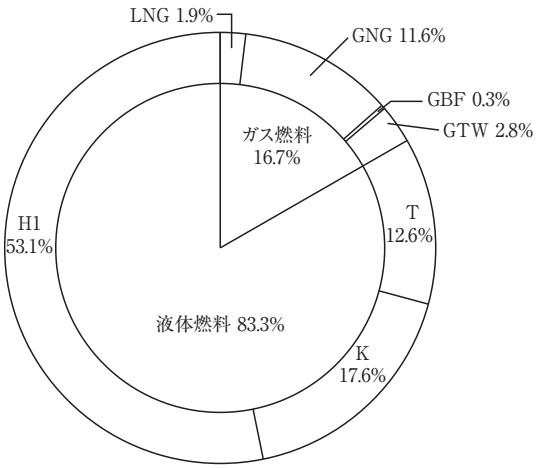


図４　2011年燃料別生産台数割合（%）

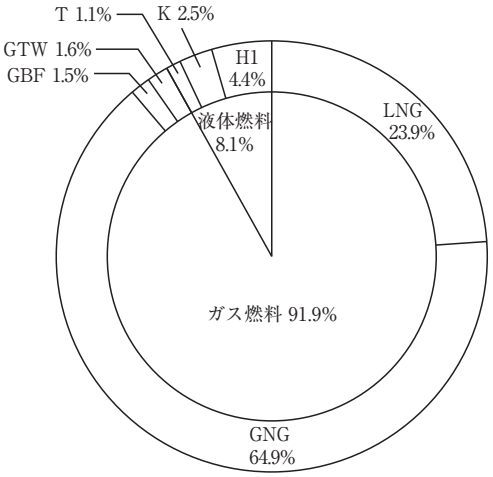


図５　2011年燃料別出力割合（%）

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

表3　2011年地域別納入台数及び出力（kW）

地域 Location	区分 Size	小型 Small Unit ～735kW		中型 Medium Unit 736～22,064kW		大型 Large Unit 22,065kW～		全出力 Total	
		台数 Units	出力 Output(kW)	台数 Units	出力 Output(kW)	台数 Units	出力 Output(kW)	台数 Units	出力 Output(kW)
国内向け Domestic Use	北海道 Hokkaido	6	1,860	3	6,400	0	0	9	8,260
	東北 Tohoku	8	4,100	4	5,200	0	0	12	9,300
	関東 Kanto	40	16,797	85	225,496	6	1,503,160	131	1,745,453
	中部 Chubu	22	8,122	20	26,284	1	32,210	43	66,616
	近畿 Kinki	11	4,501	31	77,660	1	334,000	43	416,161
	中国 Chugoku	4	1,900	1	2,000	2	162,140	7	166,040
	四国 Shikoku	4	2,200	2	1,600	0	0	6	3,800
	九州 Kyushu	6	3,000	9	14,960	1	86,450	16	104,410
	沖縄 Okinawa	0	0	1	800	0	0	1	800
	可搬型	2	4	0	0	0	0	2	4
	舶用主機 Marine Propulsion	0	0	4	58,000	0	0	4	58,000
	舶用補機 Marine Anxiliaries	0	0	7	26,544	0	0	7	26,544
	未定 Unknown	0	0	0	0	0	0	0	0
国内向け 小計 Sub Total		103	42,484	167	444,944	11	2,117,960	281	2,605,388
輸出向け For Export	北米 North America	0	0	1	1,690	0	0	1	1,690
	中南米 South Central America	0	0	0	0	0	0	0	0
	アジア Asia	0	0	10	72,650	9	1,361,900	19	1,434,550
	大洋州 Oceania	0	0	0	0	0	0	0	0
	欧州 Europe	0	0	3	5,070	3	960,900	6	965,970
	旧ソ連 Fomer Soviet Union	0	0	4	35,560	4	115,660	8	151,220
	中東 Middle East	0	0	0	0	3	599,500	3	599,500
	アフリカ Africa	0	0	0	0	0	0	0	0
輸出向け 小計 Sub Total		0	0	18	114,970	19	3,037,960	37	3,152,930
合計 Total		103	42,484	185	559,914	30	5,155,920	318	5,758,318

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

表4　2011年被駆動機械別生産台数及び出力（kW）

区分　Size		小型　Small Unit ～735kW		中型　Medium Unit 736～22,064kW		大型　Large Unit 22,065kW～		全　出　力 Total	
被駆動機械 Driven Machinery	コード Code	台数 Units	出　力 Output (kW)	台数 Units	出　力 Output (kW)	台数 Units	出　力 Output (kW)	台数 Units	出　力 Output (kW)
発電機 Electric Generator	G	96	40,544	171	473,781	30	5,155,920	297	5,670,245
推進機 Propeller	PRR	0	0	5	70,144	0	0	5	70,144
水ポンプ Water Pump	W	7	1,940	9	15,989	0	0	16	17,929
合　計 Total		103	42,484	185	559,914	30	5,155,920	318	5,758,318

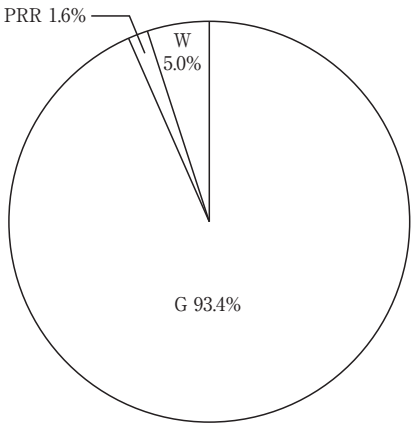


図6　2011年被駆動機械別生産台数割合（%）

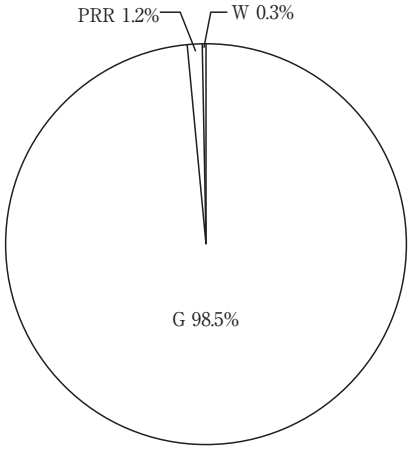


図7　2011年被駆動機械別出力割合（%）

表5　2011年出力区分別生産台数及び出力（kW）

出　力　区　分（kW） Units Output		台数 Units	出　力 Output（kW）
小　型 Small Unit 0～735kW	0～146	4	196
	147～367	30	7,567
	368～735	69	34,721
	小計　Sub Total	103	42,484
中　型 Medium Unit 736～22,064kW	736～4,412	159	312,560
	4,412～10,296	17	103,140
	10,297～16,180	7	100,214
	16,181～22,064	2	44,000
	小計　Sub Total	185	559,914
大　型 Large Unit 22,065kW～	22,065～44,129	6	177,770
	44,130～	24	4,978,150
	小計　Sub Total	30	5,155,920
合　計　Total		318	5,758,318

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

表6　2011年発電用ガスタービン用途別生産台数及び出力（kW）

区分　Size			小型　Small Unit ～735kW		中型　Medium Unit 736～22,064kW		大型　Large Unit 22,065kW～		全　出　力 Total	
用　途 Application		コード Code	台数 Units	出　力 Output(kW)	台数 Units	出　力 Output(kW)	台数 Units	出　力 Output(kW)	台数 Units	出　力 Output(kW)
国内事業用	ベースロード発電用	BL	0	0	0	0	10	2,029,060	10	2,029,060
	ピークロード発電用	PL	0	0	0	0	0	0	0	0
	非常用発電用	EM	0	0	0	0	0	0	0	0
Domestic/Public Use 国内事業用　小　計　Sub Total			0	0	0	0	10	2,029,060	10	2,029,060
国内自家用	ベースロード発電用	BL	3	927	12	43,655	1	88,900	16	133,482
	ピークロード発電用	PL	0	0	0	0	0	0	0	0
	非常用発電用	EM	90	39,553	141	315,156	0	0	231	354,709
	そ　の　他	MC	3	64	0	0	0	0	3	64
Domestic/Private Use 国内自家用　小　計　Sub Total			96	40,544	153	358,811	1	88,900	250	488,255
国内合計　Domestic Use Total			96	40,544	153	358,811	11	2,117,960	260	2,517,315
輸出事業用	ベースロード発電用	BL	0	0	0	0	2	88,800	2	88,800
	ピークロード発電用	PL	0	0	0	0	0	0	0	0
	非常用発電用	EM	0	0	0	0	0	0	0	0
For Export/Public Use 輸出事業用　小　計　Sub Total			0	0	0	0	2	88,800	2	88,800
輸出自家用	ベースロード発電用	BL	0	0	13	106,970	17	2,949,160	30	3,056,130
	ピークロード発電用	PL	0	0	0	0	0	0	0	0
	非常用発電用	EM	0	0	5	8,000	0	0	5	8,000
For Export/Private Use 輸出自家用　小　計　Sub Total			0	0	18	114,970	17	2,949,160	35	3,064,130
輸出合計　For Export Total			0	0	18	114,970	19	3,037,960	37	3,152,930
事業用	ベースロード発電用	BL	0	0	0	0	12	2,117,860	12	2,117,860
	ピークロード発電用	PL	0	0	0	0	0	0	0	0
	非常用発電用	EM	0	0	0	0	0	0	0	0
Public Use 事業用　合　計　Total			0	0	0	0	12	2,117,860	12	2,117,860
自家用	ベースロード発電用	BL	3	927	25	150,625	18	3,038,060	46	3,189,612
	ピークロード発電用	PL	0	0	0	0	0	0	0	0
	非常用発電用	EM	90	39,553	146	323,156	0	0	236	362,709
	そ　の　他	MC	3	64	0	0	0	0	3	64
Private Use 自家用　合　計　Total			96	40,544	171	473,781	18	3,038,060	285	3,552,385
総　計　Grand Total			96	40,544	171	473,781	30	5,155,920	297	5,670,245

Note：Code Explanation　BL：for Base Load　PL：for Peak Load　EM：for Emergency　MC：any other miscellaneous use

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

2．航空用ガスタービン

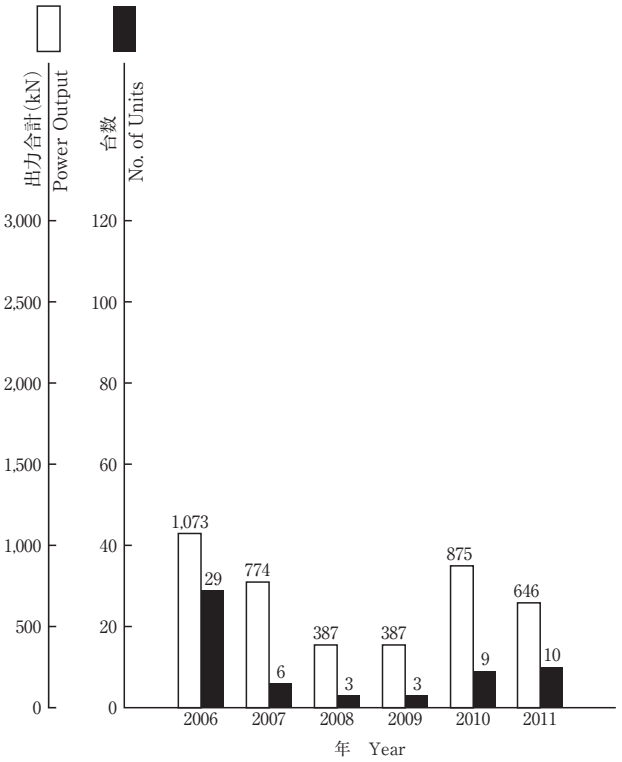


図８　ターボジェット／ターボファン・エンジン

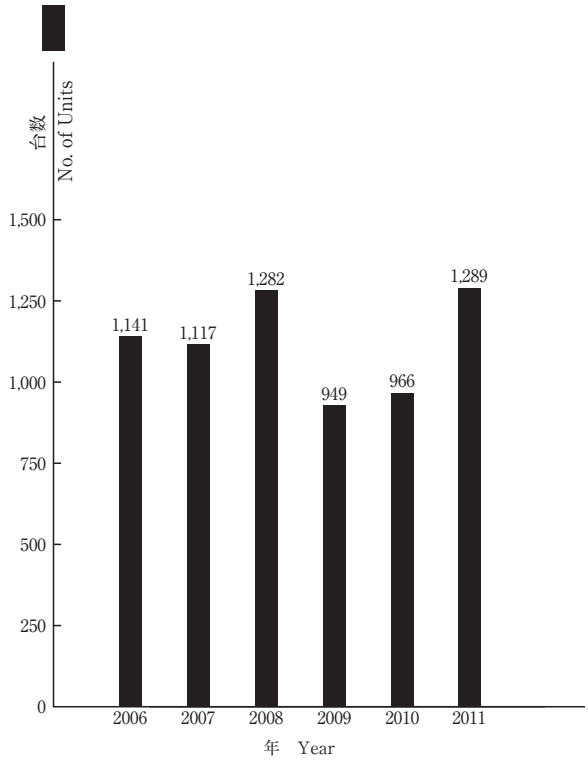


図10　民間航空エンジン用モジュール

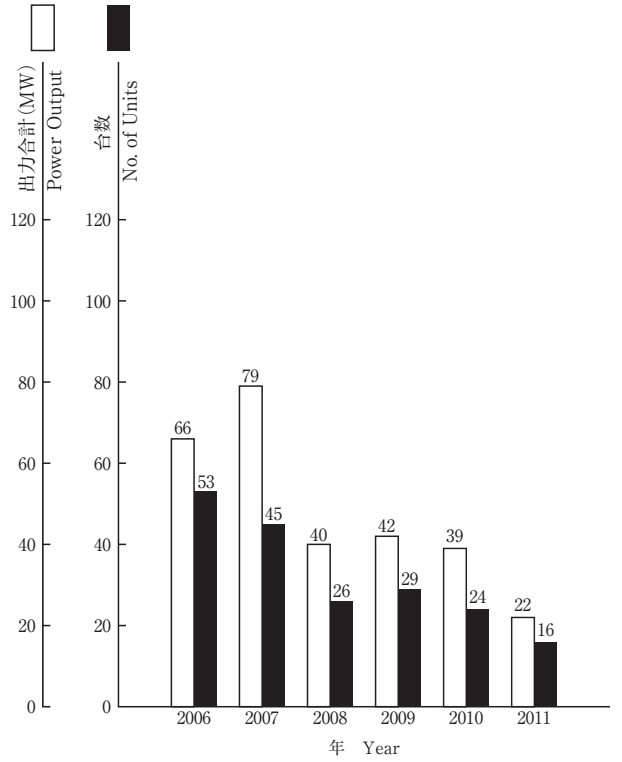


図９　ターボシャフト／ターボプロップ・エンジン

表７　2011年ターボジェット／ターボファン・エンジン
生産台数及び出力（kN）

生産台数 Number of Units	10	スラスト合計※1 Thrust	646

※１　海面上静止最大スラスト
Maximum Thrust at Sea Level Static Condition

表８　2011年ターボシャフト／ターボプロップ・エンジン
生産台数及び出力（kW）

区　分 Size	0～735kW		736kW～		全出力	
用　途 Application	台数 Units	出力※2 Output (kW)	台数 Units	出力※2 Output (kW)	台数 Units	出力※2 Output (kW)
固定翼機 Fixed Wing Aircraft	0	0	0	0	0	0
ヘリコプタ用 Helicopter	4	2,601	12	19,074	16	21,675
補助機関駆動用 Aux. Drive Units	0	0	0	0	0	0
合　計 Total	4	2,601	12	19,074	16	21,675

※２　海面上静止常用出力
Normal Output at Sea Level Static Condition

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

3．過給機

表９　クラス別の年間生産台数

区　分 Size							
Class	圧縮機翼車外径(mm) Outside Diameter of Compressor Impeller	2006年	2007年	2008年	2009年	2010年	2011年
Class 1	0～ 100	約435万	約481万	約529万	約275万	約345万	約354万
Class 2	101～ 200	28,370	35,284	42,225	24,918	37,723	45,680
Class 3	201～ 300	557	551	508	503	482	643
Class 4	301～ 400	263	238	232	185	134	111
Class 5	401～ 500	173	169	175	131	110	57
Class 6	501～ 600	183	212	303	272	231	294
Class 7	601～ 700	224	249	322	290	282	362
Class 8	701～ 800	65	64	48	47	50	55
Class 9	801～ 900	193	176	205	194	150	214
Class 10	901～1000	0	0	0	0	0	0
Class 11	1001～	33	8	0	0	3	24
合計 Total※4		30,061	36,951	44,018	26,540	39,165	47,440

※３　型式はいずれも排気タービンである。
Every model is an exhaust turbine type supercharger.
※４　合計数は，圧縮機翼車外径100mmを越す分を示す。
The figure shows total number of superchargers over 100mm in impeller diameter.

表10　クラス別の型式数※3

区　分 Size							
Class	圧縮機翼車外径(mm) Outside Diameter of Compressor Impeller	2006年	2007年	2008年	2009年	2010年	2011年
Class 1	0～ 100	87	89	61	62	62	64
Class 2	101～ 200	30	26	26	26	29	29
Class 3	201～ 300	22	14	14	15	16	18
Class 4	301～ 400	20	14	15	16	16	15
Class 5	401～ 500	15	11	11	12	12	10
Class 6	501～ 600	12	11	11	12	12	14
Class 7	601～ 700	13	13	13	13	14	17
Class 8	701～ 800	5	5	5	5	6	5
Class 9	801～ 900	11	11	12	12	11	8
Class 10	901～1000	0	0	0	0	0	0
Class 11	1001～	2	2	2	2	2	1
合計 Total※4		130	107	109	113	118	117

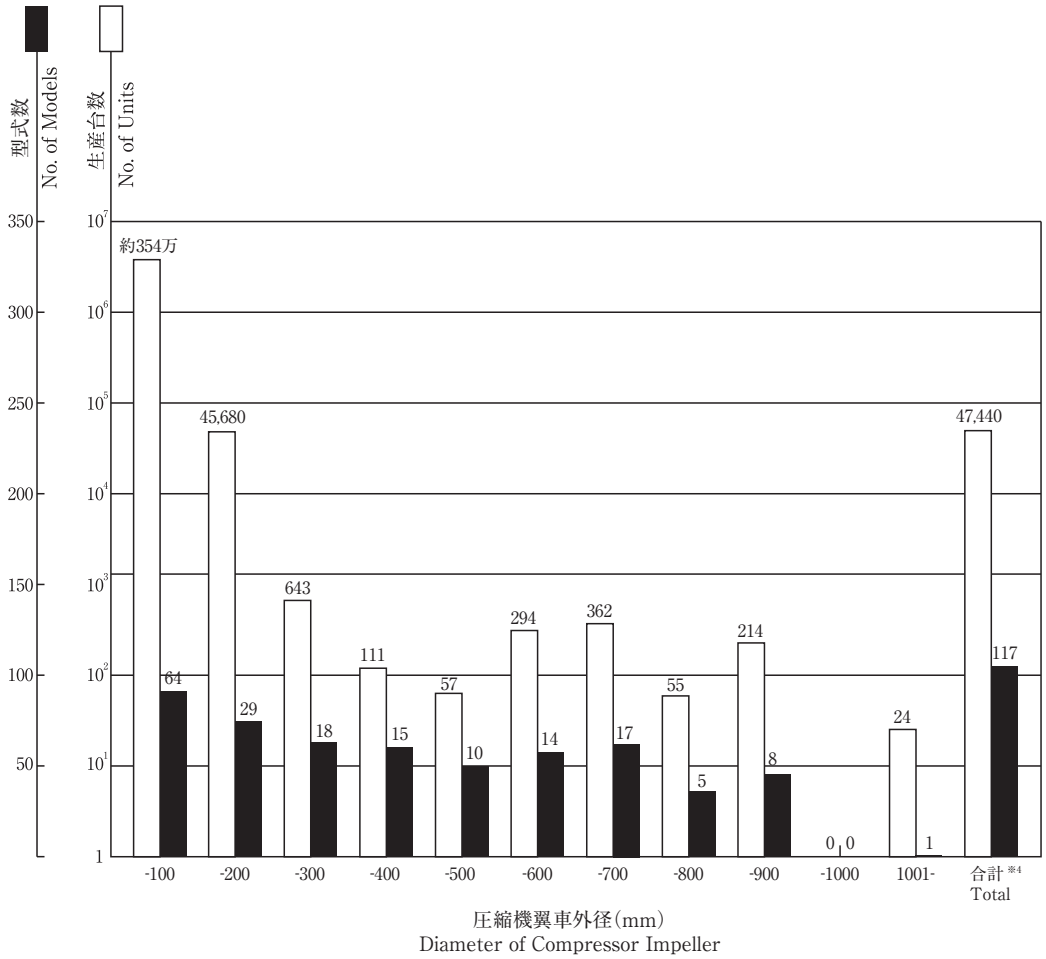


図11　2011年過給機生産台数及び型式数

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

報　告

学会創立40周年記念行事報告

創立40周年記念事業実行委員会

1．はじめに

本学会は1972年（昭和47年）６月に日本ガスタービン会議として発足し，その後1976年（昭和51年）６月に社団法人に改組された。更に昨年３月には公益社団法人として再出発し，現在に至っている。これまで創立10周年，20周年，30周年と記念事業を実施し，また25周年には学会25年史が刊行された。これらの事業を継続して，創立40周年を迎える2012年度に記念事業を実施することとし，2010年末から計画を開始して，2011年度に準備委員会を発足させ，準備を行って来た。本年４月20日の通常総会の日には記念行事を実施し，盛況のうちに無事終了した。

創立記念事業を継続的に実施することは，学会の歩み，日本のガスタービン技術の歩みを振り返るとともに，今後の一層の発展に向けて語り合う機会を設ける，意義の深い事業であると考えられる。

ここでは40周年記念行事の実施状況を報告するとともに，記念事業全体の準備経過と企画の概要をご紹介する。

2．創立40周年記念事業の概要と記念行事の準備経過

上で述べた経緯および観点から，創立40周年記念事業は以前から想定され，予算手当ても計画されて来た。公益社団法人となってからは記念事業積立金が計画的に運用されており，長期計画のもとで予算措置が行われている。

2010年12月に当時の野崎理総務委員長を中心として関係者による打ち合わせ会議が持たれ，基本的な方針が検討された。その結果40周年事業は学会の財政状況等を考慮して実施することを理念とし，式典や出版などを実施することが提示された。これを受けて2011年度に創立40周年記念事業準備委員会が設置された（2012年度初頭から実行委員会に改称）。委員会で事業の具体計画が立案され，最終的に創立40周年記念事業として，記念行事（集会）・出版・表彰の各事業を実施することとなった。

2.1　記念行事

2012年４月20日㈮の通常総会に合わせて記念集会を開催する計画のもと，総会終了後に記念式典・記念講演・祝賀パーティーを実施することとした。会場は総会と同じ三菱重工横浜ビル33階を使わせていただくことで準備が進められた。

記念式典は2002年の30周年記念式典に倣って実施する方針で，祝辞の他，功労者表彰や感謝状の贈呈，出版事業の紹介等を行うこととした。その後，記念講演2件をお願いする企画を立案し，航空エンジンの展望と産業用ガスタービンの展望をそれぞれ40分程度でお話しいただく計画を進めた。また，夕刻からは祝賀パーティーを会費制で実施する方針とした。それぞれの企画については以下に報告される。

2.2　出版事業

⑴ガスタービン教科書の出版

ガスタービンの基礎的な教科書を刊行することが技術普及委員会により計画され，企画が進行している。この教科書はこれまで教育シンポジウムで使われてきた教材をベースに内容を改訂し，体裁を整えた上で学会から発刊するものである。創立40周年記念事業として2012年度に編集作業を行い，2013年春に発行する計画である。

⑵学会誌記事

2012年度の学会誌に記念記事を掲載する予定である。現在，学会誌編集委員会により年度内に掲載する方向で計画が練られている。また，2012年発行の各号表紙に創立40周年のロゴを載せることになり，既に１月号から実施されている。

2.3　表彰・感謝状贈呈

創立20周年および30周年記念事業で実施された功労者の表彰を，今回も同じ要領で実施することとした。また，学会活動への貢献度が高い賛助会員・協賛企業に感謝状を，やはり30周年のときに準じて贈呈することとした。

実行委員会構成（敬称略）
委員長：筒井康賢
委員：太田有，幸田栄一，福山佳孝，二村尚夫，
　　船﨑健一，山本誠，渡辺紀徳

3．記念式典

2012年４月20日㈮15：30～16：30，三菱重工業㈱横浜ビル33階大会議室において，日本ガスタービン学会創立40周年記念式典が挙行された。参加者は約110名であった。以下，式次第の順に概要を報告する。

開会にあたり，筒井実行委員長からの挨拶があり，多くの学協会において会員数が減少傾向にある中，本会の会員数は減少しておらず，会員諸氏の本会諸活動への協力に感謝の意を表するとともに，今後もこのすばらしい

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

伝統を引き継いで行きたい旨の発言があった。

佃嘉章会長から，本会を代表して挨拶が行われた。40年前の本会創立時のエピソードがユーモアを交えて紹介され，本会の次の10年を会員諸氏が一致団結して作っていこうという，全会員のガスタービンに対する思いを代弁するかのような力強い発言で締めくくられた（写真１参照）。

続いて他学協会からの来賓による祝辞をいただいた。まず，日本機械学会会長・金子成彦殿（東京大学）の代理として日本機械学会理事・植田利久殿（慶應義塾大学）より，福島第一発電所の事故を踏まえ，エネルギー問題が我が国喫緊の課題であり，その解決に向けてガスタービンが果たす役割は非常に重要である旨の言葉をいただいた。日本航空宇宙学会会長・川口淳一郎殿（JAXA）からは，製造から創造へのパラダイムシフトに直面している現在，日本航空宇宙学会と日本ガスタービン学会には，より緊密な協力関係の構築が必要であり，共に頑張っていきたいという旨の祝辞をいただいた。ターボ機械協会会長・坂口順一殿（千代田化工建設）からは，この40年でガスタービンにイノベーションが起き，これからはガスタービンが真に活用される時代である。そのような時代においてターボ機械協会と日本ガスタービン学会が一層協力することが必要である旨の言葉をいただいた。最後に，ASME-IGTI理事・Seung Jin Song殿（ソウル国立大学）から，ガスタービンはエネルギー分野および輸送分野で非常に重要な役割を担っており，日本ガスタービン学会の貢献は非常に大きい。また，ASME-IGTIと日本ガスタービン学会との協力関係は長年に亘り続いており，一層の協力関係を築きたいとの祝辞をいただいた（写真２）。

次に祝辞披露として，韓国流体機械協会（KFMA），中国科学アカデミー（CAS），ドイツ機械学会（VDI），フランス機械学会（SFM）からの祝辞が読み上げられた。いずれも本会40周年を祝い，協力関係に感謝する内容となっていた（時間の都合で一部省略）。

引き続き佃会長より，これまで本会に顕著な貢献のあった方々に功労賞を贈呈する旨の趣旨説明があり，正面スクリーンに示された39名の方々が紹介された。また同会長により感謝状贈呈が行われた。（詳細は後述する。）

最後に，福山佳孝記念出版事業委員長（JAXA）より，本会40周年を記念して出版する予定のガスタービン教科書について，その内容と出版スケジュールが紹介され，滞りなく記念式典が閉会となった。

４．記念講演会

創立40周年記念行事の一環として，記念式典と同じ三菱重工業㈱横浜ビル33階大会議室において16：30～18：00に記念講演会が開催され，航空機用エンジンおよび産業用ガスタービンのそれぞれに関する技術動向や展望に関する２件の講演がなされた。記念講演会は当学会会員以外の参加も広く受け付けることとして実施され，約110名の聴衆が参加した。以下に講演の概要を記す。

写真１　佃会長による挨拶

写真２　Song教授による祝辞

１件目の講演は㈱ＩＨＩ航空宇宙事業本部長の石戸利典氏より「航空機用エンジンの動向」と題して，航空機用エンジン技術開発動向，わが国における開発の歩み，航空機開発における事業構造，当該分野におけるわが国の技術力，競争力の向上に向けた進言がなされた。先ず技術動向として高バイパス比化，高圧力比化，高温化などの技術動向が紹介され，引き続きわが国における民間用や防衛省用エンジンの開発の歴史が紹介された。さらに，航空機開発における事業環境や事業構造が説明され，巨額の投資が必要となる次世代機の開発には，国際的な行動開発，アライアンスが不可欠なことが説明された。さらにその中でわが国の総合技術力や競争力を向上させていくための方策として，素材技術などの強みを生かしてコスト競争力で世界の先頭を目指すべきなどの提案がなされた。

２件目の講演は三菱重工業㈱原動機事業本部長代理の六山亮昌氏より「産業用ガスタービンの最新技術動向と展望」と題して，同社における産業用ガスタービン技術開発のこれまでの流れと今後に向けた取り組みが紹介された。同社はこれまでも世界に先駆けて高温・高効率

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

写真３　石戸氏による講演

写真４　六山氏による講演

化を進め，昨年には1600℃級のM501Jガスタービンの出荷を開始した。この開発にはムーンライト計画における高効率ガスタービンの開発や1700℃級ガスタービンを対象とした要素技術開発，実用化技術開発などの国のプロジェクトにおける研究開発成果が活用されており，ガスタービン開発における国のプロジェクトの重要性が強調された。さらに要素技術開発についても最新の技術開発動向が紹介されるとともに，燃料多様化への取り組みとしてBFG焚コンバインドサイクルや石炭ガス化複合発電（IGCC）への取り組み状況や太陽熱ガスタービンの検討状況が紹介された。

５．祝賀パーティー

40周年記念式典に引き続き，18時30分より同じく三菱重工横浜ビル33階において祝賀パーティーが開催された。坂田公夫副会長の挨拶，GTSJ設立を良くご存知の高田浩之東京大学名誉教授のご発声による乾杯でパーティーは賑やかに始まった。公益社団法人としての初めての総会を終えて，ようやく参加者の緊張もほぐれ，旧知の親交を深める人，産学官，長幼の垣根を越えて，技術者同士の交流の花が咲き，40年間，変わらずに続いている当学会の開放的な気風が，本学会員の底流に流れていることを感じるひとときである。見晴らしの良い窓越しに横浜港の夕景が沈み，ベイブリッジの夜景が浮かび上がるころには，学会賞受賞者の方々から受賞の喜びと現在の取り組み，若い奨励賞受賞者には指導された教官からの激励などが披露され，さらに，有賀一郎慶応大学名誉教授より，40年前に遡って設立当時の苦心と思い出話とソウル国立大学のSeung Jin Song 教授からは，この10年での学会の国際化への努力と称賛，今後の協力を望む内外の声が伝えられた。また功労者を代表して，速水洋九州大学名誉教授のご挨拶を頂き，締めくくりに，日常の学会活動を支えて頂いている事務局の職員の皆様への感謝状が贈呈され，和やかなうちに10年後の一層の盛会を期して，筒井康賢実行委員長の手締めで散会となった。

６．功労賞・感謝状

創立から40年間，本学会は多くの個人会員の方々や賛助会員のご協力に支えられ発展を続けて来た。

学会活動と運営への顕著なご貢献を顕彰するため，創立20周年には134名，30周年には32名の個人会員に功労賞が授与されている。この度はその後の10年間も含めて多大な貢献をいただいた個人会員39名の方々を対象に，記念式典会場において佃嘉章会長から功労賞が贈呈された。受賞者の方々は，これまでの功労賞受賞者および名誉会員を除く個人会員の中から，会長，副会長，監事，理事，委員長，委員の経験回数をもとに，実行委員会で候補者を選出し，理事会で審議決定された。

一方，学会の運営に大きく貢献された賛助会員・協力会社のうちから，ガスタービン・エネルギー技術の発展のみならず，広告などを通して顕著なご支援をいただいた８社に感謝状を贈呈した。

功労賞受賞者（五十音順，敬称略）

壹岐　典彦	伊佐治　強彦	石井　潤治
石田　克彦	太田　有	加藤　千幸
川池　和彦	木村　武清	古賀　勉
児玉　秀和	小森　豊明	杉本　隆雄
鈴木　和雄	園田　豊隆	瀧花　清作
武石　賢一郎	武田　淳一郎	辻川　吉春
辻田　星歩	野崎　理	橋本　啓介
服部　学明	林　茂	速水　洋
福田　雅文	福山　佳孝	藤岡　昌則
藤綱　義行	二村　尚夫	船崎　健一
真家　孝	三嶋　英裕	満岡　次郎
三巻　利夫	宮下　和也	六山　亮昌
山根　敬	吉岡　洋明	渡辺　康之

感謝状贈呈先（五十音順，敬称略）

(株)ＩＨＩ	川崎重工業(株)
(株)東芝	ニッセイエブロ(株)
(株)日立製作所	丸和電機(株)
三井造船(株)	三菱重工業(株)

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

会　告

第40回日本ガスタービン学会定期講演会（釧路）・見学会のお知らせ（予告）

第40回日本ガスタービン学会定期講演会・見学会を以下のように開催します。プログラム他詳細は，決まり次第，学会ホームページに掲載いたします。また，９月号にも掲載予定です。

主　　催：公益社団法人 日本ガスタービン学会

協　　賛：協賛団体はガスタービン学会ホームページ（http://www.gtsj.org/）をご覧ください。

開 催 日：
・講演会　2012年10月17日㈬，18日㈭
・見学会　2012年10月19日㈮

開催場所：
・釧路市観光国際交流センター　北海道釧路市幸町３－３
http://www.kushiro-kankou.or.jp/kkc/
㈳釧路観光協会　Tel：0154-31-1993

講 演 会：
・一般講演：空力，燃焼，システム，伝熱，材料，タービン蒸気等
・特別講演：未定
・企画：「将来のエネルギー動向と需給システム（仮題）」等を予定。

参加登録費：
・会員・登壇者　13,650円（ただし，学生は論文集有りで4,200円，論文集無しで1,050円）
・協賛会員　　15,750円（ただし，学生は論文集有りで4,200円，論文集無しで1,050円）
・会員外　　18,900円（ただし，学生は論文集有りで7,350円，論文集無しで4,200円）

懇 親 会：
・第１日目の講演会終了後，釧路全日空ホテルにて開催予定です。
住所：北海道釧路市錦町３－７，Tel：0154-31-4111，http://www.anahotelkushiro.jp/
懇親会参加費：3,150円

学生による優秀発表の表彰：
・学生による「研究報告」で，講演申込時にエントリーがあったものの中から，特に優秀な発表に対して表彰を行います。

見 学 会：
・日　時：10月19㈮
・見学先：太平洋炭礦炭鉱展示館，㈱道新総合印刷釧路工場等の見学を予定しています。
・定　員：45名程度，先着順，講演会参加登録者に限ります。
・参加費：6,300円

参加申込方法：
・プログラム等詳細決定次第，学会ウェブサイト（http://www.gtsj.org/）に掲載いたします。ウェブサイトから登録されるか，９月号掲載参加申込書に必要事項をご記入の上，学会事務局宛にお申込み下さい。参加登録は，受付の混乱を避けるため，事前登録をお願いします。講演者も参加登録をお願いします。

関連情報：
・講演会の前日（10月16日）に市民フォーラムを計画しています。参加自由・無料の予定です。こちらも合わせてご予定ください。

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

会　告

第22回ガスタービン教育シンポジウム開催のお知らせ

近年，ガスタービン技術の発展にはめざましいものがあり，航空機用ジェットエンジンをはじめ大規模発電やコジェネレーション用や船舶用エンジンとして幅広く用いられています。ガスタービンは高出力・高効率であることやNOx排出を抑えることが比較的容易であることから，環境に優しい原動機として今日の人類のエネルギー問題に寄与する大変重要な役割を担っております。また，将来の地球温暖化防止に向けてガスタービンの更なる高効率化・大容量化が強く求められており，多岐にわたる研究・開発分野で若い技術者の活躍が期待されます。この様な背景から，学生及びガスタービン開発に携わる新人技術者を対象とした本年度２回目の標記シンポジウム開催を関西地区で計画しました。会員・非会員を問わず積極的にご参加下さい。

１．日　時：　2012年９月13日㈭，９月14日㈮

２．場　所：　川崎重工業株式会社　明石工場　研修センター（明石市川崎町１番１号）
＜JR西明石駅：下車徒歩25分
JR明石駅：明石市バス「貴崎行き」約10分「マツダ前」下車徒歩３分＞

３．プログラム：

13日㈭	９：30-	受付　（明石工場　研修センター）
	10：00-10：10	開会の挨拶
	10：10-11：40	「ガスタービン概論」　伊藤栄作（三菱重工業）
	11：40-13：00	昼食
	13：00-14：30	「ガスタービンと流体工学」 坂元康朗（三菱重工業）
	14：40-15：30	「川崎重工業株式会社におけるガスタービンの開発」 永留世一（川崎重工業）
	15：50-17：15	明石工場　生産設備・試験設備見学（官学参加者） 川崎重工業のガスタービン技術の紹介（企業参加者）
	17：30-19：00	懇親会
14日㈮	９：00-	受付
	９：20-10：50	「ガスタービンと伝熱工学」 武石賢一郎（大阪大学）
	11：00-12：30	「ガスタービンと燃焼工学」 木村武清（川崎重工業）
	12：30-13：30	昼食
	13：30-15：00	「ガスタービンと材料工学」 高橋孝二（三菱重工業）
	15：10-16：40	「ガスタービンと制御工学」 足利　貢（川崎重工業）
	16：40-16：50	アンケート記入
	16：50-	閉会の挨拶

４．定　員：60名

５．対象者：大学，大学院，高等専門学校在籍者，ならびに技術者（ガスタービン初心者）

６．参加費（税込）：学生（会員：￥2,625，非会員：￥5,775），社会人（会員：￥10,500，非会員：￥16,275）
（注：当日入会可，入会金￥500，年会費：学生会員 ￥2,500，正会員 ￥5,000）

７．懇親会：参加費　無料

８．受講証の発行：２日間の講義を受講された方は，「ガスタービン教育シンポジウム受講証」を発行します。

９．申込方法：下記の申込書に必要事項を明記し，学会事務局宛に，郵便，ファクシミリ，電子メールのいずれかにより2012年８月29日㈬（必着）までに，お申し込み下さい。
学会ホームページからも申込ができます。

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

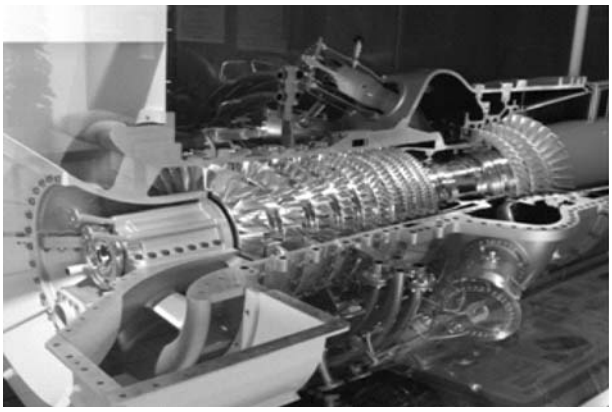
10. 参加費の支払：当日支払いですが，事前の支払いも受け付けます。事前に支払う場合は下記の所に振り込みを行ってください。またその旨を学会事務局にファクシミリ，電子メール等でお知らせ下さい。
振込先：銀行（みずほ銀行新宿西口支店　普通預金1812298）　郵便振替（00170-9-179578）

11. その他

○交通：JR西明石駅下車の場合：東改札口を出て南側へ下りる。徒歩７～８分で西門，西門から徒歩15分で研修センター。JR明石駅下車の場合：山陽電鉄南側，南４番のりばより「貴崎行き」,「貴崎循環藤江行き」で「上の宮北口」（マツダ前）下車徒歩２分で正門，正門から徒歩１分で研修センター。バス乗車時間は約10分。
○明石工場見学は官学からの参加者のみとさせて頂きますので予めご了承下さい。
○明石工場見学にはカメラおよびカメラ付携帯電話の持ち込みが出来ませんので予めご了承下さい。
○昼食：実費弁当申し込みを承ります（飲物付きで800円程度です）。
○宿泊施設：斡旋はいたしませんので必要な方は各自手配してください。

注：この期間，電力需要が供給能力を大幅に上回ることが予想される夏季にあたることから，空調の運転を停止させていただくことがあります。講義室の気温が高くなることが予想されますので，参加者各位におかれましては，できるだけ軽装でご出席いただき，水分の補給等の熱中症対策をご準備ください。

エネルギーセンター



L20Aガスタービンカットモデル

第22回ガスタービン教育シンポジウム参加申込書

（2012年９月13日，９月14日）

日本ガスタービン学会　行

FAX：03-3365-0387　TEL：03-3365-0095　E-mail：gtsj-office@gtsj.org

氏名		国籍	
所属		学年，入社年度	
連絡先	〒		
TEL		FAX	
E-mail			
懇親会	出　・　欠	昼食申込	13日　・　14日

注）外国籍の参加者には，申込書に記載した情報の他にパスポート番号などの情報をお知らせしていただきます。詳しくは，申込書受付後にご連絡いたします。

申込締切日：　2012年８月29日㈬（必着）

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

訃 報

名誉会員　**鳥崎忠雄** 氏

2012年４月20日 86歳にて逝去されました。

同氏は本学会の前身「日本ガスタービン会議」より評議員・役員を歴任されました。また，本学会の発展に多大の尽力をされるとともに我が国のガスタービン工業の発展のためにも大いに貢献されました。

ここに謹んで哀悼の意を表します。

略歴

1947年	東京帝国大学第一工学部卒業
1949年	東京帝国大学大学院前期修了
1956年	総理府　航空技術研究所
1976年	科学技術庁　航空宇宙技術研究所 航空機公害研究グループ総合研究官
1982年	同所　原動機部長
1985年	同所　科学研究官
1988年	三井造船㈱　技術顧問
1988年	日本大学　総合科学研究所　教授
1996年	日本大学　退職
［本会関係略歴］	1972年入会，1996年４月名誉会員 GTCJ　評議員（１,２,３,４期） GTSJ　理事（１,２,５,６,９,10期）

鳥崎忠雄先生を偲んで

松木　正勝[*1]

本学会名誉会員鳥崎忠雄先生は病気療養中の所，平成24年４月20日逝去されました，誠に哀惜の念に堪えません。

先生は昭和22年９月東京帝国大学第一工学部卒業，昭和24年９月大学院前期課程修了。同年10月日平産業株式会社，昭和27年７月ヤンマーディーゼル株式会社に勤務され，昭和31年３月総理府航空技術研究所に入所されました。

以来，原動機部メンバーとして我が国の航空エンジンの発展に尽力されました。

昭和31年からは第一期６カ年計画に於いてジェットエンジン要素試験設備として，空気源設備，圧縮機試験設備，タービン試験設備，燃焼器試験設備，高速翼列試験設備，構造強度試験設備を整備するとともに，圧縮機，タービンなどの高速回転翼列試験機による研究を進めました。

昭和38年から超軽量ジェットエンジンの研究開発を始めJR100ジェットエンジンを完成し，このエンジンによる高度制御の研究を終え，さらにFTBに装着してVTOL機の離着陸，ホバリングの研究を行い，自由飛行に成功しました。

昭和46年からは通産省大型プロジェクトによる航空機用ジェットエンジンの研究開発に従事してFJR710を完成しました。昭和51年からは性能機能試験，耐久試験，低周波疲労試験，氷吸い込み，水吸い込み，鳥吸い込み，着氷試験，騒音試験等を行い，さらに昭和52年11月に航空性能試験を英国国立ガスタービン研究所で行い成功しました。

昭和53年にSTOL実験機“飛鳥”にFJR710／600の搭載が決定し，昭和60年10月に初飛行に成功し，平成元年３月“飛鳥”は最終飛行試験を成功裏に終了しました。この間エンジンの玉成を図り航空機用として完成させました。

このように計画段階から従事したエンジンを搭載した航空機に搭乗して飛行する経験を持てたことは，誠に稀有のことであり，うれしい事でありました。

以上のように，昭和31年航技研に着任以来退官されるまでジェットエンジンの研究開発に従事し，我が国航空エンジン界の成長に大きく寄与されました。

思えばJR100のときはデーター処理はパラメトロンコンピュータであり，電卓もワープロも無い時代でした。

高度制御の実験を行った角田支所を開設した時には本所への電話は朝申し込んで昼につながる状態でした。支所内の仮設小屋に宿泊して，高度制御の実験，騒音試験，更にFTBの自由飛行まで　数年間VTOL関係の実験を行いました。FJRの時代には各種の環境試験を行いました。試験の内容も時代とともに高度化し，懐かしい思い出です。

長年にわたり，我が国航空エンジン界の発展に尽力された先生の功績を偲び，謹んでご冥福をお祈り申し上げます。

＊１　元 日本ガスタービン学会 会長

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

会　告

▷入 会 者 名 簿◁

〔正会員〕

山添　正裕(東京大学)　林　亮輔(東京理科大学)　阿部　浩和(東北電力)　兼子　誠(電源開発)
橋口　勝一(防衛省)　高　学林(三菱重工業)　安部　直樹(三菱重工業)　野口　真太郎(三菱重工業)
鈴木　史典(IHI)　天沼　光博(エイ・エス・アイ総研)　安川　英雄(川崎重工業)
樋口　隆行(川崎重工業)　西家　隆行(数値フローデザイン)　木村　泰徳(日立製作所)
真柄　洋平(日立製作所)　藤井　達(日立製作所)　西村　仁志(ファームコンサルティング)

〔学生会員〕

泰中　一樹(大阪大学)　大宮　修一郎(東京大学)　有波　裕貴(新潟大学)　石川　智貴(法政大学)
金井　洸太(早稲田大学)　福本　敦(早稲田大学)

〔学生会員から正会員〕

分銅　克(東芝)　秋山　直輝(東京農工大学(博士課程後期))

◯本会共催・協賛・行事◯

主催学協会	会合名	共催/協賛	開催日	会場	詳細問合せ先
日本機械学会	「機械の日・機械週間」記念行事	協賛	2012/8/4,7	国立科学博物館，日本学士院講堂	日本機械学会 http://www.jsme.or.jp/kikainohi/
可視化情報学会	第12回可視化フロンティア「PIV講習会2012」	協賛	2012/9/4	LMJ東京研修センター３階大会議室	可視化情報学会 http://www.vsj.or.jp/
日本機械学会関西支部	第321回講習会「新エネルギーシステムのフロンティア技術を学ぶ」-次世代の新エネルギー技術で未来の社会像を描く-	協賛	2012/9/20-21	大阪科学技術センター中ホール	日本機械学会関西支部 TEL:06-6443-2073,FAX:06-6443-6049 E-MAIL:info@kansai.jsme.or.jp
日本機械学会	2012年度計算力学技術者（CAE技術者）認定事業	協賛	2012/9/22-23,12/22		日本機械学会 TEL:03-5360-3506 URL http://www.jsme.or.jp/cee/cmnintei.htm
日本液体微粒化学会	第21回微粒化シンポジウム	協賛	2012/12/17-18	東京工業大学　大岡山キャンパス西９号館	日本液体微粒化学会 http://www.ilass-japan.gr.jp

【お詫びと訂正】

本誌第40巻第２号（2012年３月号）に掲載しました「2011年国際ガスタービン会議大阪大会」の「３．特別講演」,「２．Plenary Invited Lecture」において講演者名に誤りがありました。

関係各位にお詫びするとともに以下に訂正いたします。

p. 118右欄第２段落

（誤）. . .　Rolls-Royce社のDavid Komaya氏によって講演がなされた。

（正）. . .　Rolls-Royce社の**Dr. Simon Weeks**氏によって講演がなされた。

なお，正しい講演者名を記載するとともに，一部の数値等を更新した同国際会議報告書和文版および英文版のPDFファイルを本会ホームページに掲載予定ですので，ご覧いただければ幸甚です。

（IGTC'11 実行委員会委員長 武石賢一郎）

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

会　告

2012年度役員名簿

会長	佃　嘉章（三菱重工）
副会長	坂田　公夫（JAXA）
法人管理担当執行理事	幸田　栄一（電中研），六山　亮昌（三菱重工），山脇　栄道（ＩＨＩ），渡辺　紀徳（東大）
公益目的事業担当執行理事	畔津　昭彦（東海大），太田　有（早大），加藤　泰弘（日立），永井　勝史（川崎重工），二村　尚夫（JAXA），船崎　健一（岩手大），古谷　博秀（産総研），村田　章（東京農工大），山根　秀公（防衛省）
理事	高西　一光（関西電力），田沼　唯士（帝京大），寺本　進（東大），新関　良樹（東芝），宮原　忠人（エネルギーアドバンス）
監事	本阿弥眞治（東京理科大），吉田　豊明（JAXA）

2012年度委員名簿（順不同）

2012年６月27日現在

○は委員長

運営委員会　○渡辺　紀徳（東大），伊藤　高根，太田　有（早大），笠原　公輔（ＩＨＩ），加藤　泰弘（日立），川上　龍太（東京電力），幸田　栄一（電中研），小森　豊明（三菱重工），酒井　義明（東芝），村田　章（東京農工大），山脇　栄道（ＩＨＩ）

企画委員会　○幸田　栄一（電中研），太田　有（早大），加藤　泰弘（日立），六山　亮昌（三菱重工），山脇　栄道（ＩＨＩ），渡辺　紀徳（東大）

国際委員会　○中村　良也（アイ・エヌ・シー・エンジニアリング），石田　克彦（川崎重工），太田　有（早大），岡井　敬一（JAXA），小森　豊明（三菱重工），廣光　永兆（ＩＨＩ），福田　雅文（物材研），藤綱　義行（ESPR），船崎　健一（岩手大），松田　寿（東芝），三好　市朗（日立），山根　敬（JAXA），山本　誠（東京理科大），渡辺　紀徳（東大）

学術講演会委員会　○山本　武（JAXA），壹岐　典彦（産総研），内田　竜朗（東芝），太田　有（早大），斉藤圭司郎（三菱重工），高橋　康雄（日立），武田　淳一郎（富士電機），東部　泰昌（川崎重工），仲俣千由紀（ＩＨＩ），姫野　武洋（東大），平野　孝典（拓殖大），渡邊　裕章（電中研）

集会行事委員会　○二村　尚夫（JAXA），岡　芳彦（三井造船），加藤　泰弘（日立），木村　武清（川崎重工），酒井　英司（電中研），澤　徹（東芝），谷光　玄行（ＩＨＩ），仲村　晋（ＪＡＬエンジニアリング），中村　友行（防衛省），西村　英彦（三菱重工），古谷　博秀（産総研），松沼　孝幸（産総研），藤井　達（日立），水野　拓哉（JAXA），山形　通史（富士電機），山根　秀公（防衛省），山本　誠（東京理科大），吉田　英生（京大）

ガスタービン技術普及委員会　○山根　秀公（防衛省），秋山　陵（日立），伊藤　栄作（三菱重工），賀澤　順一（JAXA），木村　武清（川崎重工），齊藤　大蔵（東芝），仲村　晋（ＪＡＬエンジニアリング），福山　佳孝（JAXA），古川　洋之（ＩＨＩ），宮原　忠人（エネルギーアドバンス），村田　章（東京農工大），屋口　正次（電中研），山本　誠（東京理科大），渡辺　紀徳（東大）

学会誌編集委員会　○船崎　健一（岩手大），荒木　秀文（日立），壹岐　典彦（産総研），刑部　真弘（東京海洋大），柏原　宏行（川崎重工），加藤　千幸（東大），川上　龍太（東京電力），岸根　崇（三菱重工），櫻井　一郎，佐藤　哲也（早大），鈴木　伸寿（東芝），鈴木　康文（防衛省），田沼　唯士（帝京大），辻田　星歩（法大），寺澤　秀彰（東京ガス），寺本　進（東大），中野　健（ＩＨＩ），新関　良樹（東芝），服部　学明（三井造船），早田　陽一（ダイハツ），北條　正弘（JAXA），三鴨　正幸（中部電力），山下　一憲（荏原），吉野　展永（ＩＨＩ），渡辺　和徳（電中研）

英文論文集編集委員会　○渡辺　紀徳（東大），山根　敬（JAXA），壹岐　典彦（産総研），石田　克彦（川崎重工），太田　有（早大），加藤　大（ＩＨＩ），幸田　栄一（電中研），柴田　貴範（日立），鈴木　康文（防衛省），田頭　剛（JAXA），姫野　武洋（東大），船崎　健一（岩手大），山本　武（JAXA），山本　誠（東京理科大），吉岡　洋明（東芝）

ガスタービン統計作成委員会　○永井　勝史（川崎重工），山上　展由（三菱重工），井出　琢磨（ＩＨＩ），荒木　伸二（日立），米田　幸人（ヤンマー），澤　徹（東芝），恵比寿　幹（三菱重工），原田　純（川崎重工），野村　藤樹（ターボシステムズユナイテッド）

産官学連携委員会　○渡辺　紀徳（東大），赤城　正弘（防衛省），壹岐　典彦（産総研），石井　潤治（東芝），岡崎　正和（長岡技術科学大），幸田　栄一（電中研），永留　世一（川崎重工），西澤　敏雄（JAXA），幡宮　重雄（日立），福泉　靖史（三菱重工），藤岡　順三（物材研），船崎　健一（岩手大），古川　雅人（九大），本阿弥眞治（東京理科大），満岡　次郎（ＩＨＩ），吉田　英生（京大）

広報委員会　○杉本　隆雄（兵庫県立大），村田　章（東京農工大），船崎　健一（岩手大），寺本　進（東大），姫野　武洋（東大），東部　泰昌（川崎重工），松沼　孝幸（産総研），山根　敬（JAXA）

表彰委員会　○坂田　公夫（SKYエアロスペース研究所），太田　有（早大），加藤　泰弘（日立），二村　尚夫（JAXA），船崎　健一（岩手大），村田　章（東京農工大），渡辺　紀徳（東大）

財政健全化委員会　○坂田　公夫（SKYエアロスペース研究所），山脇　栄道（ＩＨＩ），渡辺　紀徳（東大），幸田　栄一（電中研），六山　亮昌（三菱重工），鈴木　健（ＩＨＩ）

創立40周年記念事業実行委員会　○筒井　康賢（高知工科大），太田　有（早大），幸田　栄一（電中研），福山　佳孝（JAXA），二村　尚夫（JAXA），船崎　健一（岩手大），山本　誠（東京理科大），渡辺　紀徳（東大）

ACGT2012実行委員会　山根　敬（JAXA），福田　雅文（物材研），船崎　健一（岩手大），松田　寿（東芝），山本　誠（東京理科大），渡辺　紀徳（東大）

調査研究委員会　○濱　純（産総研），壹岐　典彦（産総研），岸部　忠晴（日立），小森　豊明（三菱重工），辻田　星歩（法大），永井　勝史（川崎重工），満岡　次郎（ＩＨＩ），山本　悟（東北大）

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

編集後記

毎年夏になると「節電」,「省エネ」という言葉を目にする機会が多くなりますが，特に今年は，日本全体が「電力」について再認識した年であると言えるのではないでしょうか。エネルギーを安定供給するということにおいて従来課題とされてきた経済性，資源の有限性，対環境性に加え，今後は，安全性というキーワードが強調されると思われます。これらの課題をクリアする革新的なエネルギーの開発を行なう一方で，できるだけエネルギーや資源を節約する方法を考えなければなりません。

今月号の特集は,「最新のガスタービンにおける修理・補修技術」と題し，巻頭言を含め７編の解説記事を掲載致しました。ガスタービンは，高温，高圧の燃焼ガスを作動流体としているため酸化や熱応力による損傷を受けやすく，また，形状が複雑かつレアメタル等の材料を使用しているため各部品が高価であるという特徴を持ちます。従って，適切な点検，評価に基づいて修理・補修を行い，信頼性を損なうことなく長寿命化を図る運用が不可欠となります。今回のテーマは中枢技術を取り扱うもので，執筆者の方々におかれましては，どこまでを記事として掲載するかの判断が難しかったと想像致しますが，メーカー，エアライン，研究所，大学のそれぞれの観点から，補修・再生技術，計測・診断技術，寿命管理，運用技術について，幅広い内容を盛り込めたのではないかと思っております。

また，宮下様より「第10回ターボチャージャ国際会議」のご報告を頂きました。ターボチャージャおよびエンジン技術に特化した非常に中味の濃い学会であることが伝わってきました。どうもありがとうございます。また，今月号には例年通り，ガスタービンおよび過給機に関する生産統計を掲載致しました。作成いただいた統計作成委員会の方々にお礼申し上げます。

最後になりましたが，執筆者の方々には，ご多忙の中，快くお引き受けいただきましたことを編集委員一同，心から感謝申し上げます。個人的には今まであまりなじみのない分野でしたので，原稿を拝読し，技術の進歩に驚愕するとともに，そろそろ自分自身のオーバーホールも必要かなと感じた次第です。会員の皆様方におかれましては，健康にご留意の上，良い夏をお過ごしいただけるようご祈念申し上げます。なお，本号の企画編集は，柏原委員（川崎重工），岸根委員（三菱重工），吉野委員（ＩＨＩ），と佐藤（早稲田大学）が担当致しました。

（佐藤哲也）

（表紙写真）
今回の表紙については論説・解説の各著者より提供していただいております。
詳細については各記事を御参照ください。

・ガスタービン翼の補修技術開発 ……（130 ～ 134）
・ガスタービンの保守技術 ……（141 ～ 146）

☘事務局だより✉☘

梅雨まっただ中，紫陽花の鮮やかな今日この頃ですが会員の皆様如何お過ごしでしょうか。

事務局長を引継いでから一年が過ぎ，二周年目に入りました。一通りのこと（ミスも？）を経験し，少しは分かったつもりでいましたが，中々そうは問屋が卸さず，見過ごしていたことを改めて学んでいるところです。

さて，今年の通常総会を振り返ってみますと事務局としては定款の一部改定が重要事でした。まず，代表理事が一人体制から二人体制になったことで，一時的な代表理事の空白時間が無くなりました。これによって，通常総会直後に開かれる臨時理事会の議事録の確認に必要な印鑑が理事全員の実印から代表理事の実印だけに緩和されました。これで理事全員の実印が押された書類がコピーする際に皺くちゃになるという悪夢を見ることもなくなります。次は，定款改定に必要な正会員の３分の２以上（約1300人以上）の賛成条項です。実は，はがきの投票用紙は1000枚程お送りしましたが戻ってきたのは２割に達しませんでした。一方，電子投票は追い込み時期に投票をお願いする電子メールを何度か出して，何とか３分の２賛成条項をクリアしました。費用のかかる郵便に頼っていたのではただじっと待つだけだったかもしれません。来年の事になりますが，はがきによる投票を希望されている会員の皆様にあっては是非文明の利器のご利用を選んで頂けると幸いです。よろしくお願い申し上げます。

今年度の行事になりますが，７月に開催されます教育シンポジウムと10月に釧路で開催されます定期講演会の講演申込には多数のエントリーを頂きました。有り難うございます。また，調査研究委員会の東日本大震災におけるガスタービン関連施設の被害状況と非常用発電装置の稼働状況に関する調査は先ごろ報告書がまとまりました。そう遠からぬ時期に報告会が催されますので，是非こちらも多数のお申し込みをお願い申し上げます。

（平岡克英）

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

学会誌編集規定

2003.8.29改訂

１．本学会誌の原稿はつぎの３区分とする。
Ａ．投稿原稿：会員から自由に随時投稿される原稿。執筆者は会員に限る。
Ｂ．依頼原稿：本学会編集委員会がテーマを定めて特定の人に執筆を依頼する原稿。執筆者は会員外でもよい。
Ｃ．学会原稿：学会の運営・活動に関する記事（報告，会告等）および学会による調査・研究活動の成果等の報告。

２．依頼原稿および投稿原稿は，ガスタービン及び過給機に関連のある論説・解説，講義，技術論文，速報（研究速報，技術速報），寄書（研究だより，見聞記，新製品・新設備紹介），随筆，書評，情報欄記事，その他とする。刷り上がりページ数は原則として，１編につき次のページ数以内とする。

論説・解説，講義	6ページ
技術論文	6ページ
速報	4ページ
寄書，随筆	2ページ
書評	1ページ
情報記事欄	1/2ページ

３．執筆者は編集委員会が定める原稿執筆要領に従って原稿を執筆し，編集委員会事務局まで原稿を送付する。事務局の所在は付記１に示す。

４．会員は本学会誌に投稿することができる。投稿された原稿は，編集委員会が定める方法により審査され，編集委員会の承認を得て，学会誌に掲載される。技術論文の投稿に関しては，別に技術論文投稿規程を定める。

５．依頼原稿および学会原稿についても，編集委員会は委員会の定める方法により原稿の査読を行う。編集委員会は，査読の結果に基づいて執筆者に原稿の修正を依頼する場合がある。

６．依頼原稿には定められた原稿料を支払う。投稿原稿および学会原稿には原則として原稿料は支払わないものとする。原稿料の単価は理事会の承認を受けて定める。

７．学会誌に掲載された著作物の著作権は原則として学会に帰属する。
　但し，著作者自身または著作者が帰属する法人等が，自ら書いた記事・論文等の全文または一部を転載，翻訳・翻案などの形で利用する場合，本会は原則としてこれを妨げない。ただし，著作者本人であっても学会誌を複製の形で全文を他の著作物に利用する場合は，文書で本会に許諾を求めなければならない。

８．著作者は，学会または学会からの使用許諾を受けた者に対し著作者人格権を行使しない。

９．本会発行の著作物に掲載された記事，論文などの著作物について，著作権侵害者，名誉毀損，またはその他の紛争が生じた場合，当該著作物の著作者自身又は著作者の帰属する法人等を当事者とする。

付記1．原稿送付先および原稿執筆要領請求先
〒105-0004 東京都港区新橋5-20-4
Tel. 03-5733-5158　Fax. 03-5733-5164
ニッセイエブロ㈱ 制作部 編集制作課
E-mail：eblo_h3@eblo.co.jp
学会誌担当　佐藤孝憲

技術論文投稿規定

2010.8.27改訂

１．本学会誌に技術論文として投稿する原稿は次の条件を満たすものであること。
1）主たる著者は本学会会員であること。
2）投稿原稿は著者の原著で，ガスタービンおよび過給機の技術に関連するものであること。
3）投稿原稿は，一般に公表されている刊行物に未投稿のものであること。ただし，要旨または抄録として発表されたものは差し支えない。
２．使用言語は原則として日本語とする。
３．投稿原稿の規定ページ数は原則として図表を含めてＡ４版刷り上がり６ページ以内とする。ただし，１ページにつき16,000円の著者負担で４ページ以内の増ページをすることができる。
４．図・写真等について，著者が実費差額を負担する場合にはカラー印刷とすることができる。
５．投稿者は原稿執筆要領に従い執筆し，正原稿１部副原稿（コピー）２部を学会編集委員会に提出する。原稿には英文アブストラクトおよび所定の論文表紙を添付する。
６．原稿受付日は原稿が事務局で受理された日とする。
７．投稿原稿は技術論文校閲基準に基づいて校閲し，編集委員会で採否を決定する。
８．論文内容についての責任は，すべて著者が負う。
９．本学会誌に掲載される技術論文の著作権に関しては，学会誌編集規定７．および８．を適用する。

日本ガスタービン学会誌
Vol.40　No.4　2012.7
発行日　2012年７月20日
発行所　公益社団法人日本ガスタービン学会
編集者　船﨑　健一
発行者　佃　　嘉章
〒160-0023 東京都新宿区西新宿7-5-13
第３工新ビル402
Tel. 03-3365-0095　Fax. 03-3365-0387
郵便振替 00170-9-179578
銀行振込 みずほ銀行 新宿西口支店
㈱ 1703707
印刷所　ニッセイエブロ㈱
〒105-0004 東京都港区新橋5-20-4
Tel. 03-5733-5158　Fax. 03-5733-5164

©2012，公益社団法人日本ガスタービン学会

複写をご希望の方へ
本学会は，本誌掲載著作物の複写に関する権利を一般社団法人学術著作権協会に委託しております。
本誌に掲載された著作物の複写をご希望の方は，一般社団法人学術著作権協会より許諾を受けて下さい。但し，企業等法人による社内利用目的の複写については，当該企業等法人が公益社団法人日本複写権センター（一般社団法人学術著作権協会が社内利用目的複写に関する権利を再委託している団体）と包括複写許諾契約を締結している場合にあっては，その必要はございません（社外頒布目的の複写については，許諾が必要です）。

権利委託先　一般社団法人 学術著作権協会
〒107-0052　東京都港区赤坂９－６－41　乃木坂ビル３Ｆ
FAX：03-3457-5619　E-mail：info@jaacc.jp

複写以外の許諾（著作物の引用，転載，翻訳等）に関しては，㈳学術著作権協会に委託致しておりません。直接，本学会へお問い合わせください。

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.