

特集：トライボロジー

## トライボロジー入門（摩擦・摩耗及び潤滑）

渡辺 孝一\*1  
WATANABE Kouichi

キーワード：摩擦，摩耗，潤滑，油膜厚さ，焼き付き

題名に記したトライボ (Tribo) という言葉であるが、言葉の起源はギリシアにある。元々は、こすり合う2つの物体間の接触部分にかかわる学問体系である。機械部品においては、単なる接触だけということは殆どなく、力を伝達するための手段として、接触が存在する。したがって、こすり合うという事態は避けられないことになる。こすり合うということは、摩擦が発生することである。摩擦とは、一般に運動に抵抗する現象のことを指すのだが、運動が意図されたものであれば摩擦は邪魔者には違いないが、摩擦そのものを意図した場合は、摩擦はなくてはならないものでもある。人が歩けるのも、靴と地面の摩擦があればこそであるが、摩擦の恩恵を肌身で感じている人は意外と少ない。意図されたものであろうがなかろうが、摩擦が繰り返されると、摩耗という現象が次に発生する。摩耗にも、意図したものとこれに反するものがあるが、これらは見方を変えれば、役に立つようにいかにコントロールするかにかかっている。ここでは、日常経験している摩擦・摩耗の様々な現象をトライボ的視点で解説してみる。

## 1. 「真実接触面積」と「見かけの接触面積」

接触する2つの物体は一体どれだけの面積で接触するのだろうか？例えば、片方の手のひらに絵の具を塗って、もう片方の手のひらに合わせると、接触した面積がわかることになるが、多分、手のひら全面に絵の具が転写されていくことはない。この理由は、手のひらが凸凹しているからであって、凸の部分だけが触るからである。手のひらに限らず、全ての物体の表面は、よく見ると微視的には必ず凸凹がある。例えが適切ではないかも知れないが、トライボロジーで扱う接触面積も、原理はこれと変わらない。このような表面を持った2つの物体を接触させたときに、実際に接触している面積が「真実接触面積」と呼ばれるものであり、手のひらの大きさそのものが「見かけの接触面積」と呼ばれている。表面に凸凹がある以上、真実接触面積は見かけの接触面積より必ず小

さくなる。機械製品の物体の表面は、0.001ミリ以下程度の凸凹の連続であることが知られている。このような凸凹同士を接触させると、凸の部分は塑性変形により元の状態には戻らないような変形をしてしまうことがわかっている。このような変形が一旦始まると、外力がそれ以上大きくならなくても変形は進むことになる。凸凹の表面を平滑なもので接触させた模式を図1で表してみた。微少な凸の表面は塑性変形して接触し、 $A_1+A_2+\dots$ が真実の接触面積になっている。このとき、外力 $W$ は接触部分に分散していくことになるが、塑性変形しているの、どの接触部分も変形量に関係なく、塑性変形を開始する面圧 $p_y$ になっているはずである。

すると、

$$\begin{aligned} W &= W_1 + W_2 + W_3 + \dots \\ &= p_y \cdot (A_1 + A_2 + A_3 + \dots) \\ &= p_y \cdot A \end{aligned}$$

が成立しなければならないが、ここで誘導された $A$ が「真実接触面積」ということになる。

これを書き直せば、

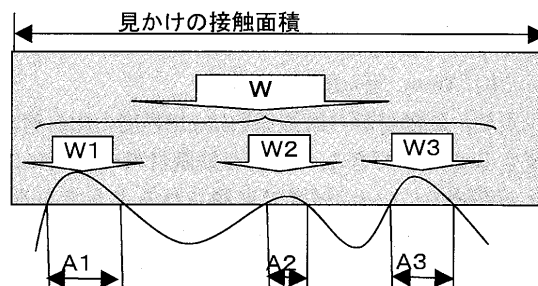
$$A = W / p_y$$

ここで $p_y$ の性格を考えると、表面の塑性変形抵抗を示すものであるから、これは硬さに相当する。

そこで、改めて硬さ $H$ という記号に書き換えると

$$A = W / H$$

つまり、真実の接触面積は接触する物体の硬さに反比例し、外力に比例して広くなるという日常生活での経験則を説明している。そこで、改めて摩擦の一般的な特徴



$$\begin{aligned} W_1 / A_1 = W_2 / A_2 = W_3 / A_3 = \dots = p_y \\ A_1 + A_2 + A_3 + \dots = \text{真実の接触面積} \end{aligned}$$

図1 真実接触面積の概念

原稿受付 2007年7月18日

\*1 ㈱不二越部品事業部・技術1部

〒930-8511 富山市不二越本町1-1-1

を考えてみると次のようになる。

## 2. 摩擦の一般的な特徴と理論値

接触しあう2つの物体が相対運動するときに発生する摩擦の性質が、次のようなものであることを我々は日常生活の中で掴んでいる。

- ①荷重が大きいほど摩擦は大きい
  - ②接触している「みかけの面積」が大きくても小さくても摩擦力は変わらない
  - ③すべり速度が速くても遅くても摩擦力（動摩擦力）は変わらない
  - ④硬いものほど摩擦は小さい
  - ⑤材料が同じなら摩擦係数はほとんど同じ
  - ⑥油が在ると摩擦は小さい
- ①～③はアモントン・クーロンの摩擦法則といって経験則である。

### 2.1 摩擦係数の理論値

これらの特徴を最も適切に説明できる現在の理屈は、接触し合う2物体の凹凸面に生じた微小突起部分の塑性変形した部分に、接触面が「擬着（くっつきこうとする性質）」しようとする力に逆らう力が摩擦であろうとする考え方である。この「真実接触面積」と呼ばれている面が、荷重 $W$ を受けて引きずろうとするときに必要な力 $F$ は、単位面積（例えば $1\text{ mm}^2$ ）当たりの剪断力を $s$ とすると、

$$F=A \cdot s$$

と表されるはずである。

一方真実接触面積 $A$ は材料の硬さ $H$ と荷重 $W$ の比 $W/H$ となることが既にわかっているので

$$F=s \cdot W/H$$

書き直して

$$F/W=s/H=\mu$$

となり、単位面積あたりの微小凹凸の剪断力 $s$ を硬さ $H$ で除したものが、摩擦係数 $\mu$ として理論化できることになるのである。硬さは材料特有の数値であり、また硬さが分母に来ているので、これでほとんどの経験則が説明できるようになった訳である。材料には降伏点応力 $\sigma_Y$ といって、これだけの力（応力）がかかると塑性変形を開始することを示す材料固有の数値がある。鉄鋼材料の場合、 $s$ はほぼ $0.5\sigma_Y$ であり、同様に硬さ $H$ は $2.8\sigma_Y$ の程度なので、これらを代入すれば

$$F/W=s/H=0.5/2.8=0.178$$

つまり、鉄鋼材料の摩擦係数は0.18程度の固有値として見積もることができる（実際の鉄鋼材料の表面には酸化膜などがあり0.1～0.2程度で実測されるようである）。このようにして、摩擦とは微小な接触面積の擬着に抗する剪断力として理解されるようになってきている。

### 2.2 擬着摩擦以外の摩擦の発生要素

摩擦力の大きさは、擬着だけでは説明がつかないこと

はすでにわかっている。今日わかっているものには、この他に「掘り起こしによる摩擦」といって、硬いものが軟らかいものに沈んでしまってもそのまま滑るときに軟らかいものの接触部分を掘り起こしながら移動するときの摩擦も、生じていることもわかっている。この摩擦係数は、ある程度計算できるが、通常の機械部品では0.05程度といわれている。この他、「弾性ヒステリシス」損失による摩擦があるが、いずれも擬着による摩擦に較べると小さいので、あまり問題にされることはないようである。

### 2.3 接触の回避

これまで述べた問題は2つの物体が接触してるから生じていることである。ならば、接触を止めることはできないか、という発想は当然思いつくことである。2つの物体を押し付け合いながら、どうやって離せるのかであるが、それが油をさすことに他ならない。マクロ的には離れてはいないのだが、微視的にみると接触した領域に油が介在して接触する2つの物体を確実に遊離させているのである。後ほど記述することになるが、油のような液体にはそのような性質のあることがわかっている。水のような液体でもそのような性格は持っている。だったら摩擦はもう発生しないか、ということになるが、擬着面の剪断力は油を介して伝わることになる。だから、摩擦が完全になくなるということはない。また、油そのものの剪断抵抗が逆に発生してしまう。だが、これらを含めても、油が介在することで摩擦抵抗を極端に小さくできるので、油の存在は摩擦低減には欠かせないものになっているのである。

### 2.4 擬着のもたらすもの

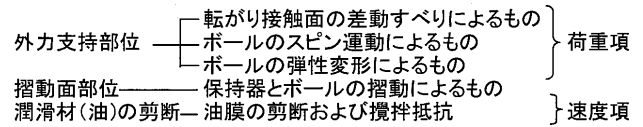
そうすると、接触面は微小な凹凸の範囲とはいえ塑性変形がおきているのだから、相対すべりを行ううちに、微少な凹凸は剥がれてきても不思議ではないことになる。実際に剥がれている。だが、この微小凹凸は0.001ミリよりもはるかに小さいレベルなので剥がれてもなかなか目に映ることはない。これが摩耗という現象である。剥がれた摩耗粉はどうなるのだろうか？通常の機械部品が使われる環境では、潤滑油のひとつの果たす役割ではあるが、洗い流されていく。剥がれた摩耗粉が、流されず、接触面に留まるとどうなるだろうか？摩耗粉はあたかも砂のような粒の固まりになって、運動を阻害するようになることもある。摩耗のメカニズムの欄で、これらのことには再度触れることにする。

## 3. 転がり軸受の摩擦

解明された摩擦・摩耗現象が産業に最も利用される分野は、転がり軸受である。転がり軸受は英語でAnti-Friction-Bearingと呼ばれ、転がり運動を採用することで、滑りという相対運動を極力小さくしたものである。それでも微視的にみれば、すべり運動はゼロではない。転動

体にボールを使用した玉軸受で、摩擦発生部位を分類すると次のようになる。荷重に係わるものを荷重項、潤滑材に係わるものを速度項、として一般的に分類されている。

適切に設計された保持器であれば、保持器がボールから受ける力はわずかなので、保持器とボールとの摩擦は、あまり問題にされることはない。しかし、ボールの接触部分の摩擦は、接触部位の設計方法に大きく左右されることがわかっている。差動すべりは、摩擦発生原理がわかりやすいのでよく引用されるが、転がり接触面が曲面状に形成されるから発生する性質のものであり、したがって線接触軸受では発生しない(図3参照)。スピン運動というのは、ボールがコマのように廻る回転成分のことである。ただし、回転成分を持つだけでコマのようにボールが廻るわけではない。今日では、分類されたこれらの摩擦値は計算できるようになっている。このうち速度項に相当する潤滑材の抵抗が、今日では最も良く議論されるようである。



3.1 潤滑材の摩擦抵抗のメカニズム

潤滑油を適用した転がり接触部では接触面が浮き上がっている、とすでに書いたが、この状況を説明する理論が弾性流体潤滑 (EHL) 理論である。この理論によれば、接触部分に忍びこんだ油はヘルツ圧により粘度増加して、図4の油膜圧力分布のようになって外力を支持する。油膜圧力分布は基本的にヘルツの面圧分布と基本的に似た形をとるが、その中心線はヘルツの圧力分布中心線とややオフセットして発生する。このずれた量 $e$ と外力荷重 $F$ を乗じたモーメント $eF$ が転がり運動方向とは反対方向に作用してしまうので、回転抵抗が発生してしまうのである。 $e$ の数値は、荷重 $F$ の大きさにはあまり影響を受けないが、回転の速さに大きく比例して、速ければ速いほど大きくなるのが計算でわかっている。このように、潤滑油が介在することで発生する摩擦が、速度項

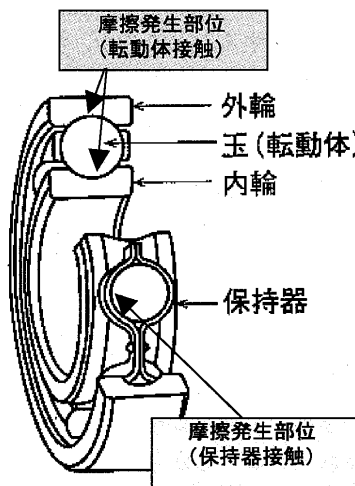


図2 単列深溝玉軸受の構造

油膜圧力中心線とヘルツ面圧分布中心線はややオフセットする

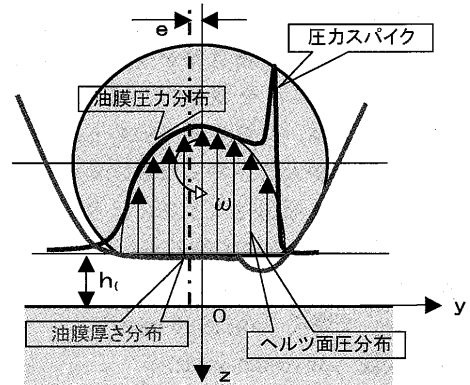


図4 EHL理論による平板上を回転するころの油膜厚さ及び油膜圧力分布

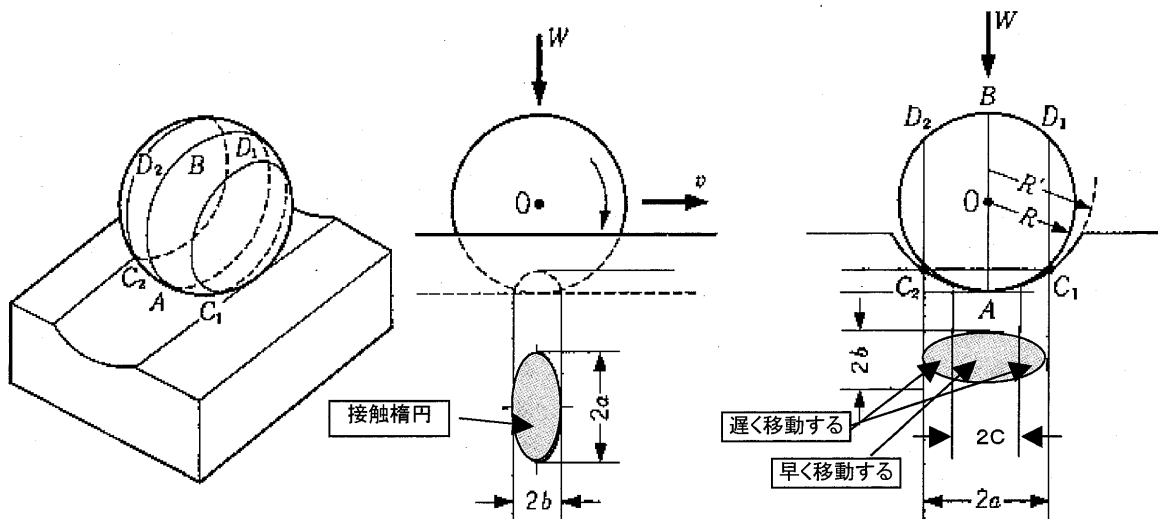


図3 ボールの曲率溝を転がるときに形成される差動すべり

と呼ばれるものである。

### 3.2 転がり軸受の摩擦抵抗

では、差動すべりやスピンすべりなど荷重項と呼ばれる摩擦は、潤滑油の影響は受けないのだろうか？影響があるのだと明確に記された論文は、まだ見たことはないが筆者はあると考えている。すべりという計算には、摩擦係数というものを設定して数値化する場面が大概出てくるのだが、この係数は、潤滑材および潤滑条件に依存すると筆者は考えている。この概念を、転がり軸受の回転数と摩擦の線図で表すと、図5のような傾向になると考えている。少なくとも、円すいころ軸受については、このことは理論的にも実験的にも検証されていて、この考え方をほかの軸受にも適用していくと、摩擦についての事実が説明しやすくなることがわかっている。このようにして、転がり軸受の摩擦は、今日ではほぼ計算できるようになってきている。

### 4. 摩耗のメカニズム

摩擦が0になることはありえない。摩擦が0ではないということは、摩耗が必ず発生するということである。ただ、摩擦の大きさと摩耗の大きさは必ずしも関係はない。例えば、鉛筆で書き物をするときは鉛筆の芯が摩耗するし、消しゴムを使っているときもそうである。この場合の摩耗は、材料の硬さにむしろ関係があるものであって、摩擦が大きいから摩耗するのではない。このように、摩耗の主原因はタイプにより異なることが多く、次のように原因別に分けて論じられることが多い。

- ①凝着摩耗 (adhesive wear)
- ②アブレシブ摩耗 (abrasive wear)
- ③腐食摩耗 (corrosive wear)
- ④疲労摩耗 (fatigue wear)

フレッチングとかピッチングとか呼ばれる摩耗は、原因系ではなくて、摩耗のタイプによる分類であり、原因別に分けた上記の摩耗形態が、絡み合って発生していることが多いようである。ここでは代表的な①凝着摩耗と②アブレシブ摩耗および代表的な摩耗タイプとしてフレッチングを取り上げてみることにする。

#### (1)凝着摩耗

真実接触面では、接触している微小な凹凸の先端は塑性変形している。そのような塑性した微小の凹凸は、接触を繰り返すうちに剥がれて母体から取り除かれてしまうことになる。これが凝着摩耗といわれている現象である。凝着摩耗が生じると、取れた摩耗粉はどうなるのか心配である。再び、もとの母体にくっついたり、あるいは、相手方にくっついたりすることになる。さらには、剥がれたりくっついたりを繰り返すこともありうる。ここで、空気の影響が、この現象の良し悪しに大きい影響をもたらすことがわかっている。つまり、剥がれた摩

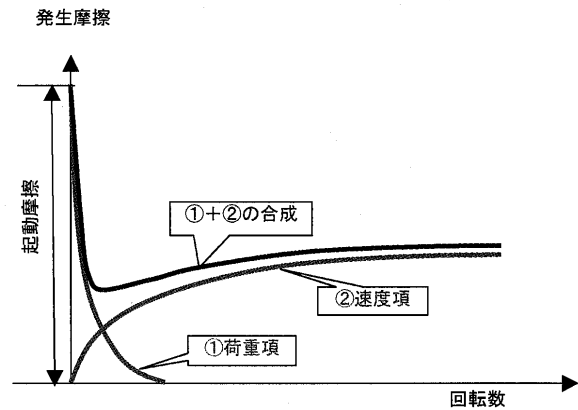


図5 転がり軸受の摩擦と回転数の一般的な関係

粉は金属原子面がむき出しになっているので、何かにくっきたいという性格を持っているのである。普段、私たちが経験する摩耗では、剥がれた摩耗粉は空気中の酸素と結合して安定な粉に変わっている。そして、このようなときの摩耗面には、特に大きな害は発生しない。これが良い摩耗であり、意図する摩耗でもあり、包丁研ぎなどはこれに相当する。ところが、宇宙のように酸素の無い環境だったらどうなるだろう？取れた摩耗粉は酸素がないので安定化できず、母体などに再度くっつくかない。くっついても微小だからすぐ剥がれる、いつまでたっても「つきたての餅」のようなものである。摩耗粉同士が集まって大きな塊になることもある。このような摩耗が、悪い摩耗である。つきたての餅のような性格の摩耗粉に、「キナコ」のように振舞っていたのが「酸素」なのである。酸素のない宇宙で、固体潤滑材として金が使用されるのは、このことがひとつの理由である。この現象は、この学説を唱えた笹田直の名をとって「笹田キナコ」と呼ばれている。しかし、酸素が在ればいつも良い摩耗が生じるというわけではない。たとえば、摩耗の進行が早くて、取れた摩耗粉が酸素とくっつく前に、次の磨耗が生じることもありうる。これが繰り返されると、悪い摩耗に移行していくことになる。たとえば、低速回転では焼き付かなかった軸受でも、高速回転した途端に焼き付いてしまうのは、このことが大きな原因の一つである。微小摩耗粉が取れたりくっついたりを繰り返して、接触面の油膜形成不良の悪循環サイクルを招くからであり、これらの様相をモデル化すると、図6のようなになる。潤滑材の機能としては、接触面の遊離等のほかに、摩耗粉の系外への持ち去りというのがあるが、高速回転において、潤滑油量が議論されるのは、この機能低下の懸念がひとつの理由になっている。このように、凝着摩耗では、摩耗の結果に環境条件が大きく左右すると考えられている。

#### (2)アブレシブ磨耗

剥がれた摩耗粉がすばやく酸素と結びついたからと

いて、全てが良い摩耗になるわけでもない。一般に、金属原子は、酸化アルミナ、酸化珪素と呼ばれているように、酸素と結びつくとも硬く変化する。これらの酸化物は、適切な潤滑環境下では、潤滑油により接触面から取り除かれてしまうのだが、それが接触面に残留したまま、硬い異物となって母体を傷つけてしまうのが、アブレシブ磨耗と呼ばれるものである。硬いものが柔らかいものを傷つけるのも、この摩耗形態である。したがって、砂などが鉄鋼表面を削ってしまうのも、この摩耗になる(砂には $\text{SiO}_2$ という鉄よりも硬い酸化物が含まれている)。この摩耗は、摩耗率(摩耗する速さ、強さを示す尺度)が大きいので、ものの加工などでは積極的に利用されるが、生じては困るところでは大変な害になるので、研究の対象になることが多いようである。

### (3)フレッチング

フレッチングとは、金属同士が小さな振動下で、接触を繰り返し受けるときに発生する摩耗形態で、微動摩耗とも呼ばれている。接触面がマクロ的に移動せず、常に特定の同じ箇所だけが振動接触するときに発生することに、この摩耗形態の特徴がある。生じているメカニズムは、擬着摩耗とアブレシブ磨耗の複合がほとんどであり、したがって、原理がわかっているので、フレッチングは

適切な手法で防止することができる。フレッチングが生じると、金属のこすり面には、剥がれた擬着摩耗粉が酸化されて茶色の粉となって出てくる。酸化した粉は、今度はアブレシブ磨耗を引き起こし、このような繰り返しが生じているのがフレッチングである。これを防止するには、接触面に油を行きわたらせることである。が、接触面は油が入るほど移動してはくれないので、わずかなすきまに浸潤してくれるような油が必要になる。潤滑材にグリースを使う場合は、軟らかいグリースを使うことで浸潤性を良くすると解決することが多いし、これらの特徴を兼ね備えた、フレッチンググリースというのも市販されている。接合部品を多く持つ自動車では、フレッチングを防止するため、このようなグリースが使用されることが多い。

### 5. おわりに

以上、摩擦と摩耗について、その基礎となる概念を書いてみた。いずれも潤滑とは密接な関係がある。そして、紙数の関係から、詳細な中身には触れていない部分が多くある。転がり軸受は他の工業製品の中でも、比較的学術的に明らかになってきている技術要素の多い分野であり、また多くの書籍も発行されている。転がり軸受をさらに、より良くお使い頂くために、本稿がお役に立てれば幸いである。

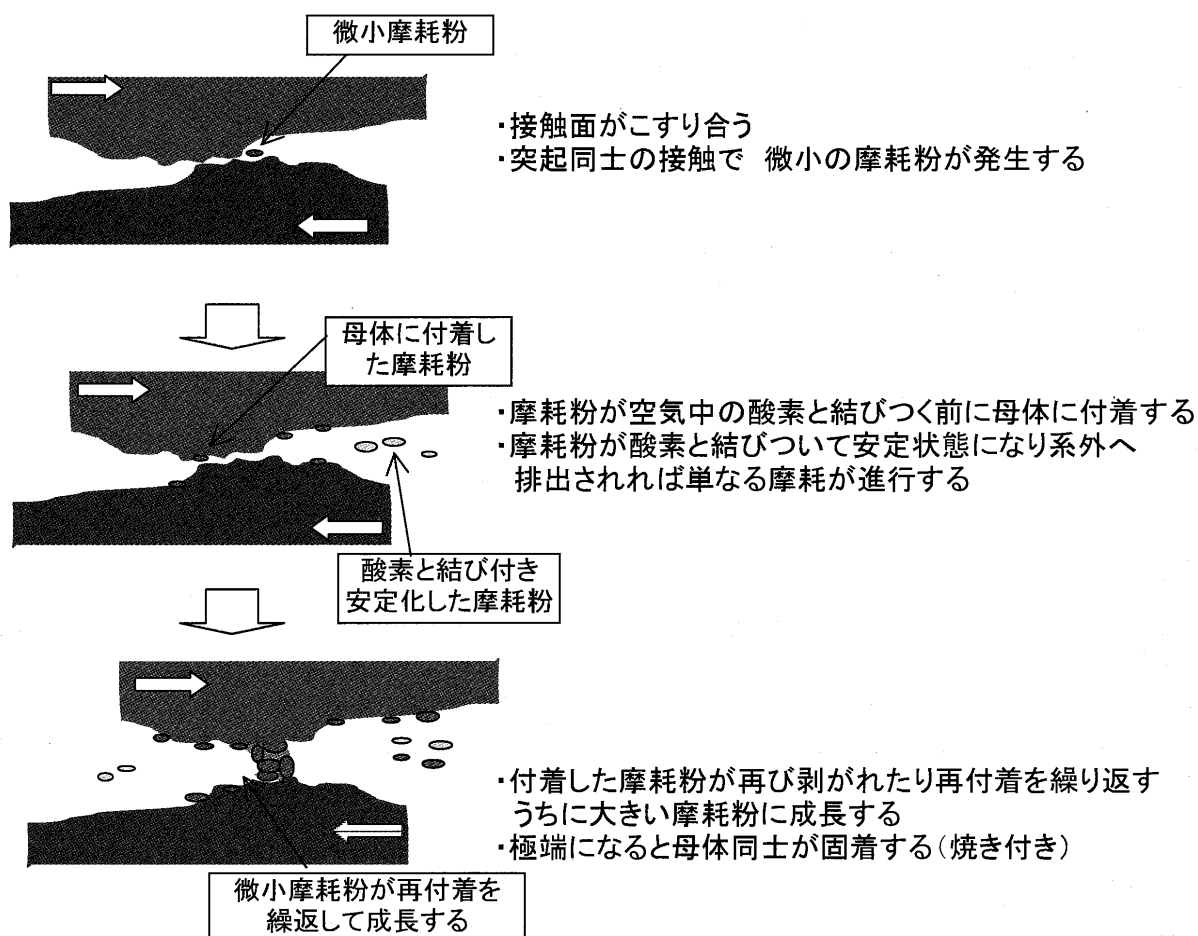


図6 摩耗粉の擬着プロセス

特集：トライボロジー

## コバルト基耐摩耗合金の特性と施工法

成田 健\*<sup>1</sup>  
NARITA Takeshiキーワード：摩耗，Co 基合金，硬化肉盛，六角形針状結晶，黒色微細結晶，M<sub>7</sub>C<sub>3</sub>

## 1. はじめに

トライボロジーとは、摩擦、摩耗、潤滑など、2つの物体面が直接あるいは間接に接触して滑り合うように相対運動した時の接触面に見られる現象や過程などに関する科学・技術をまとめていったもので、1966年以降このような総称と総合化が定着しました<sup>1)</sup>。すなわち、トライボロジーという名称は比較的新しいものの、個々の現象についてはそれ以前から調査・研究が進められており、現在に至っているのです。というのと難しく聞こえますが、わかり易い例として消しゴムでノートの字を消す場合を考えてみて下さい。消しゴムがノートに擦り付けられることにより消しゴムは小さくなり (=摩耗)、消しゴムのカス (=摩耗粉) が出ます。またチョークで黒板に字を書く、砥石で包丁を研ぐ、研磨で表面を仕上げると言ったことも摩耗現象を利用しています。しかし一方で多くの機械には滑りや転がりといった相対運動をする部分があるので、摩耗が機械の寿命を決定するとも言えますから、事実上大変重要な現象です。

一口に摩耗と言っても固体間、固体-気体間、固体-液体間で様々な摩耗の形態があります。摩耗の形態は次の四つの基本的なタイプに分類することができます。

## ①凝着摩耗 (Adhesive wear)

固体同士の真実接合部がせん断により破断することによる摩耗

## ②ひっかき摩耗 (Abrasive wear)

硬い表面上の突起や粉末等の微小切削作用によって生じる摩耗

## ③腐食摩耗 (Corrosive wear)

腐食環境において腐食反応物生成→腐食反応物の剥離を繰り返すことによる摩耗

## ④疲労摩耗 (Fatigue wear)

ベアリング等転がりを本質的に利用している場合に、転がり接合部が繰り返す応力により疲労破壊することによる摩耗

実際には一つの摩耗のタイプが単独で発生するのは稀であり、数種の摩耗現象が重複します。

## 2. 表面硬化処理方法

機械部品の表面のみが摩耗したからと言って、これを廃棄していたのでは莫大な償却費が必要となり、コスト高となります。そこで摩耗現象を抑えるために、機器を構成する材料の表面の性質 (耐摩耗性) を改善することが必要となります。現在用いられている材料の表面硬化処理方法を以下に示します。

## ①化学的方法

- ・電気メッキ
- ・化学メッキ etc.

## ②物理的方法

- ・熔融メッキ
- ・浸硫
- ・浸炭
- ・窒化
- ・浸炭窒化
- ・火炎焼入れ
- ・肉盛 etc.

## ③機械的方法

- ・圧延クラッド
- ・ショットピーニング
- ・溶射 etc.

## 3. 肉盛溶着方法

摩耗しやすい部品を耐摩耗性のある材料に置き換えることは非常に有効な方法ですが、機械部品全体を耐摩耗性のある材料で作成することは成型加工性、材料コストの点で得策でない場合が多々あります。そこで必要箇所だけを強化し、また容易に補修できる方法として耐摩耗性材料の肉盛溶着が極めて広範囲な分野で用いられています。肉盛 (Overlaying) とは「母材表面に硬化、耐食、補修、再生などの目的に応じた所要の組織と寸法の金属を溶着する方法 (JIS Z3001)」と定義されます。

異種材料を接合する一般的な方法として肉盛以外にろう付け (Brazing) および溶接 (Welding) があります。

原稿受付 2007年7月9日

\*1 三菱マテリアル(株) 桶川製作所 生産管理部  
〒363-8510 埼玉県桶川市上日出谷1230

各接合方法の概略を図1に示します。ろう付けとは溶けやすくして接合に適する合金(ろう材)を接合しようとする金属間に流し込む、または挟んで溶かすことにより異種金属を接合する方法です。一方、溶接は接合部に溶融状態の金属を作り、または供給して接合する異種金属の両者を溶融します。したがって、異種金属相互に溶け込みがあります。

硬化肉盛はろう付けと溶接の中間であり、台金の上に硬化肉盛をした場合、できるだけ相互の溶け込みを少なくし、出来上がった境界は一本の直線になるのが理想です。肉盛溶着方法の長所と短所を以下に示します。

○長所

- ・肉厚を任意に選べる
- ・作業能率が良い
- ・設備が簡単で、屋外作業が容易である
- ・肉盛しようとする製品の寸法に制限がない
- ・母材に比較的low級材を使用できる

○短所

- ・母材から成分の希釈を受ける
- ・母材の表面に高エネルギーを与えるので、製品に歪が生じる
- ・製品に品質上のバラツキが若干生じる
- ・小さくて複雑な形状の製品には適用できない

4. 肉盛材料選定の基本的考え方

第1節でも言及しましたが、磨耗の形態は様々であり、また磨耗状況は使用する環境の影響を受けます。肉盛材には磨耗の形態および使用する環境を考慮し、最適な材質を選定する必要があります。代表的な肉盛材料を図2に示します。合金別に見た肉盛材料の基本的な考え方は以下の通りです。

○Fe基合金

一般的には常温での引っかかり磨耗には最適であるが、高温下や腐食環境には耐えられない。

○タングステン炭化物合金

衝撃を伴わない、引っかかり(切削)磨耗に対して優れた性能を示す。

○Ni基合金

耐食性や耐クリープ性を優先する場合に用いる。

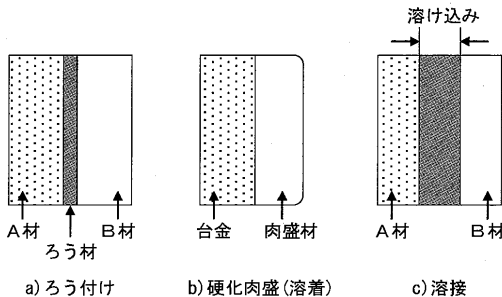


図1 各接合方法の概略

○Co基合金

耐摩耗性、耐食性、耐熱性のいずれにも優れており、特に高温での金属間摩耗、耐酸化性に優れている。

図2に示すように、一般的に硬さが増すほど磨耗による減肉量が少なくなるので耐摩耗性は向上します。一方、硬さが増すとそれと対応して脆くなるので、靱性は低下します。これらの材料は、例えば耐衝撃性はさほど要求されず、優れた耐摩耗性が要求される場合や、どちらも必要だが特に耐衝撃性が要求される場合といった用途や環境などに応じて適宜選択、使用されています。三菱マテリアル(株)では1930年代より特殊硬化および耐摩耗材料(三菱ステライト, MS)を開発製造しています。これらの合金は優れた耐摩耗性、急激な機械的ショックや熱的ショックに対する耐衝撃性、耐酸化性等を有し、鋸刃先、自動車エンジンバルブ、石油掘削用ロックビット、原子力発電所の弁座しゅう動部等に硬化肉盛材として使用されています<sup>(2),(5)</sup>。本記事では、耐摩耗合金の中でも優れた特性を有するMS合金の特長、施工方法等についてご紹介いたします。

5. 三菱ステライト (MS) について

5.1 MS合金の種類

MS合金は様々な摩耗形態および使用環境に対応するため、いくつかの種類があります。主要なMS合金の種類を表1に示します。同時に弊社のNi基耐摩耗合金についても紹介します。

代表的なMS合金は、MS No.1, No.6, No.12の3種類です。

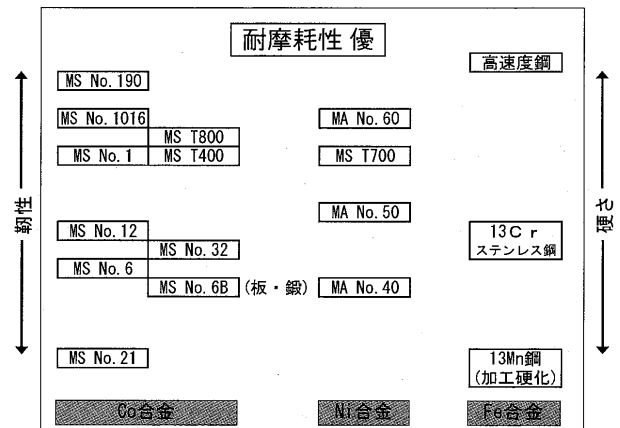


図2 代表的な肉盛材料

表1 代表的なCo, Ni基耐摩耗合金の主たる化学成分

名称	化学成分(wt%)					硬さ HRC
	Co	Ni	Cr	W	C	
MS No. 1	bal	≤3	30	12	2.5	46-54
MS No. 6	bal	≤3	28	4	1	37-44
MS No. 12	bal	≤3	29	8	1.4	40-48
MS No. 190	bal	≤3	26	14	3.2	55-57
MA No. 40	-	bal	10	-	0.4	35-40
MA No. 60	-	bal	15	-	0.75	56-62

### ○MS No. 1

MS No. 1 は代表的な三つの合金の中で最も硬い合金で、優れた耐摩耗性を有しています。また衝撃に対してやや弱い傾向を示しますが、金属間摩耗、エロージョン、腐食、常温および高温摩耗に優れています。単純な摩耗のみならず、腐食・高温等の要素が組み合わさった部分の表面硬化材として優れた特性を発揮します。主な用途はスクリーユ刃、粉碎機、ミキサー、鋸刃先等です。

### ○MS No. 6

MS No. 6 は優れた耐摩耗性と耐食性、耐熱性を兼ね備えた韌性に富んだ合金で、冷間、熱間、衝撃摩耗の分野で広く使われています。特に自動車エンジンバルブの硬化肉盛材として最も多く使用され、多くの実績があります。また腐食と摩耗を伴う化学プラントのバルブ、熱と摩耗を伴う原子力・火力発電用高温高圧バルブにも広く使用されています。

### ○MS No.12

MS No.12 はMS No. 1 とNo. 6 の中間の硬さと特性を持った合金です。No.12はNo. 1 より耐摩耗性は落ちますが、韌性が増します。またNo. 6 より耐摩耗性を必要とする場合に効果を発揮します。なお、各種バルブのシート面にはMS No. 6 とNo.12の組み合わせがよく用いられています。主な用途は内燃機関排気弁、熱間押出ダイス、溶融ガラスカッターです。

### ○MS No.190

現有のCo-Cr合金の中でCが最も高い合金です。そのため苛酷な摩耗条件下での使用に適しています。ただし機械的、熱的ショックが交じり合っている厳しい条件は避けなければなりません。主な用途は石油掘削用ロックビットです。

## 5.2 硬化肉盛方法

多くの機器では、熱処理による合金の変形や特性変化を考慮し、肉盛後に熱処理は行わず機械加工上がりで使用されています。硬化肉盛方法としては、酸素アセチレンガス、被覆アーク、TIG、PTAがあり、MS No.21において酸素アセチレンガス、MS No.32および1016において被覆アーク溶接が不可能なことを除き、全ての材種で全て硬化肉盛方法が実施可能です。MS合金を対象にした各硬化肉盛方法の特色を以下に示します。

### ○酸素アセチレンガス法

本硬化肉盛法は、アセチレン過剰炎による合金表面の「汗ばみ」現象を利用し、合金の表面層のみを溶融させて溶着する方法で、合金の溶け込みが5%以下と非常に少なく、1層で所定の硬さを得ることができます。ただし耐食性を重視する場合（オーステナイト系ステンレス鋼が合金の場合が多い）、この方法では浸炭が起こり合金の耐食性が劣化するため、TIGまたは被覆アーク溶接を用いることが望ましいです。本方法は原則として下向き姿勢に限られますが、溶着速度が大きく設備も簡単な

ため、最も一般的に用いられている硬化肉盛方法です。

### ○TIG法

本硬化肉盛法では酸素アセチレンガス法に比べ合金の溶け込み量が約25%と大きいので、2～3層の溶着が必要です。しかし酸素アセチレンガス法に見られるような浸炭現象がないので、耐食性を必要とする場合に広く使用されています。また溶接姿勢が広く取れること、酸素アセチレンガス法に比べ予熱温度が低くとれること等が利点としてあげられます。

### ○被覆アーク溶接法

TIG法と同様の目的で使用されます。合金の溶け込み量は約35%と上記二つの方法に比べて大きいですが、本方法は設備も簡単で、かなり自由な溶接姿勢がとれることから、屋外作業あるいは補修作業に適しています。また予熱温度が比較的低くとれるため、大型品への肉盛にも適しています。合金の溶け込みを抑えるため、直流逆極性（棒プラス）が望ましいです。

### ○PTA法

TIG法に比べ合金の溶け込みが少なく（約10%）、肉盛速度を速くすることができます。溶着ビードは平滑で、肉盛厚さの制御が容易です。さらに自動化が容易で熟練技術が不要です。

## 5.3 MS合金の特性

### 5.3.1 試験方法

MS No. 1, 6, 12, 190 (No. 6 :  $\phi$  4 mm, それ以外 :  $\phi$  3.2mm)をASTM A36 (炭素鋼)を台金として予熱なしで肉盛りし、各種試験を行いました。比較としてASTM A600 Type T1 (UNS T12001)の化学成分も表1に示します。本合金は一般的に18-4-1高速度鋼と称されるものです。

### 5.3.2 肉盛り条件

本試験はTIG法および酸素アセチレン法で手盛りにて行いました。TIG法は2レイヤー3パス、ストリンガービードとし、肉盛り電流は一般的な推奨範囲内で変量(70, 90, 120A)しました。酸素アセチレン法は1レイヤー1パス、ウィーピングで、アセチレン3倍還元炎としました。

### 5.3.3 試験結果

図3に各種MS合金肉盛部の断面ミクロ組織および硬さ(HRC)を示します。TIG法は溶接電流90Aのサンプルとしました。いずれの溶着方法においても、MS No. 6はデンドライト間に灰色微細結晶が観察されました。MS No.12はNo. 6よりも灰色微細結晶の量が多く、黒色微細結晶も若干点在していました。MS No. 1は灰色微細結晶の他に六角形針状結晶が観察され、黒色微細結晶もNo.12よりも多くなっていました。MS No.190はNo. 1と同じ三種類の結晶が認められ、六角形針状結晶



がより多く観察されました。またいずれの材種もTIG法の方が微細組織でしたが、TIG法と酸素アセチレン法で硬さの差異は特に認められませんでした。

図4にMS No.190 TIG材の断面ミクロ組織、硬さ(HRC)およびEPMAライン分析による台金との境界近傍におけるFe希釈(%)を示します。肉盛電流は70A, 90A, 120Aです。各溶接電流サンプルの六角形針状結晶サイズおよび硬さに顕著な差異は認められませんでした。肉盛電流120A材の台金からのFe希釈は、他のサンプルと比較して大きくなっていました。ただし、いずれのサンプルも肉盛層の硬さに直接影響をおよぼす最表面(2層目)に顕著なFe希釈は認められませんでした。

図5に各MS肉盛材の高温硬さ(Hv)を示します。比較としてASTM A600 Type T1および13Crマルテンサイト系ステンレス鋼の硬さ曲線も示します。全ての試験温度において、MS No.190は他のMS合金よりも硬くなっていました。また、MS合金の温度上昇に伴う硬さ低下は、ASTM A600 Type T1および13Crマルテンサイト系ステンレス鋼よりも緩やかでした。

MS合金組織中に観察された三種類の結晶の構造解析を行いました。全ての結晶が観察されたMS No.190を代表としました。図6にEPMA面分析結果を示し、図7にEDS結果を示します。六角形針状および灰色微細結晶はCrを主体とした $M_7C_3$ 、黒色微細結晶はW, Coを主体とした $M_6C$ であることが確認された母相部の硬さMHv576-7030に対して、 $M_7C_3$ の硬さはMHv1311-1603、 $M_6C$ はMHv512-586でした。これは $M_7C_3$ の析出量の増加に伴い、硬さも増すことを示しています。またMS No.1, No.6, No.12の母相部の硬さがMHv350-430であることから、MS No.190はW固溶硬化による母相部の硬さ増加も生じており、これら二つの効果により、MS No.190は従来のCo-Cr-W合金中で最も硬い材種となることがわかります。

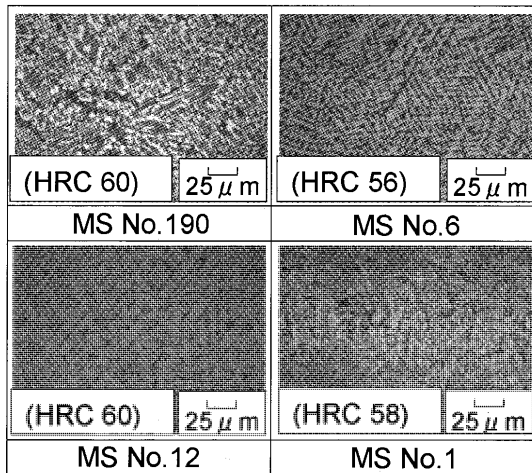


図3 各種MS合金肉盛部の断面ミクロ組織

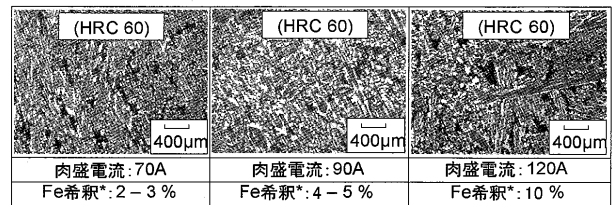
## 6. MS合金の適用事例

図8に各種MS合金肉盛部のシャルピー衝撃試験結果(常温)を示します。MS No.190, 1はNo.6, 12と比較して硬さが改善された反面、耐衝撃性は劣化しています。したがって例えばMS No.6が適正材料である環境にMS No.190を使用しても、必ずしも機器(部品)としての特性が向上するわけではありません。一定の硬さ(耐摩耗性)レベルを確保した上で更に硬さを求めるか、耐衝撃性を付与したいのかによって、適正材料は異なるのです。例えば自動車用エンジンバルブのように耐衝撃性が重視され、硬さは一定レベル以上であれば要求特性を満足する場合はMS No.6が適正材料となり、石油掘削用ロックビットのように優れた硬さが最優先特性である場合にはMS No.190が適正材料となります。

ただし適正材料を選択しても、施工が不適切であれば、その肉盛部は本来あるべき特性を発揮することができません。例として表2に、TIG法によるMS No.6肉盛部の硬さ(HRC)および台金からのFe, C希釈量(%)を示します。1層目はFeの希釈が大きく、MS No.6本来の硬さが得られません。このように溶接方法、棒径、台金材質によって適正な施工方法、条件を適宜選定することが肉盛部の特性にとって極めて重要になってきます。参考として表3に被覆アーク溶接時の適正電流範囲(例)を示し、表4にTIG時の適正電流範囲(例)を示します。

## 7. おわりに

トライボロジーという言葉が定着してから40年以上経



\*: EPMA ライン分析(台金との境界から約5mm走査)

図4 MS No.190溶接電流変量材の断面ミクロ組織

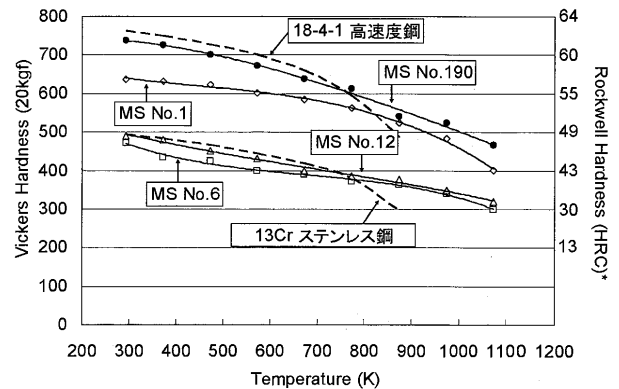


図5 各種MS合金肉盛部の高温硬さ

過していますが、それよりもはるか以前から摩耗については研究が進められ、多種多様な耐摩耗材料が開発・製造されてきました。だからと言ってこれで耐摩耗材料開発が完了ということではなく、例えば1900年代初頭には存在しなかった原子力発電機器の照射環境等、新たな要素が加わった環境や、従来よりもさらに苛酷になった環境は次々に現れており、より優れた特性を持つ材料、限られた条件でより優れた特性が得られる施工方法に対する要求はこれからも尽きることはないと思われます。かつて先達たちがそうであったように、現状に満足したり、これ以上は無理と簡単にあきらめたりせず、これからも新材料や、容易・確実に安定して所定の特性が得られる

施工方法の開発にたゆまぬ努力を続けるのが耐摩耗材料の研究・開発・製造・施工に携わる者達の進むべき道ではないかと思えます。

参考文献

- (1) 理化学辞典, p900, 1993, 岩波書店
- (2) ステンレス鋼便覧, ステンレス協会編, pp1319-1323, 1995
- (3) 溶接・接合便覧, 日本溶接学会編, pp702-711, 1990
- (4) A. J. Shiiki et al., Turbo machinery, 118 (4), 598, 1990
- (5) Metals Handbook Ninth Edition, ASM International, Vol.13, 658-668 (1987)

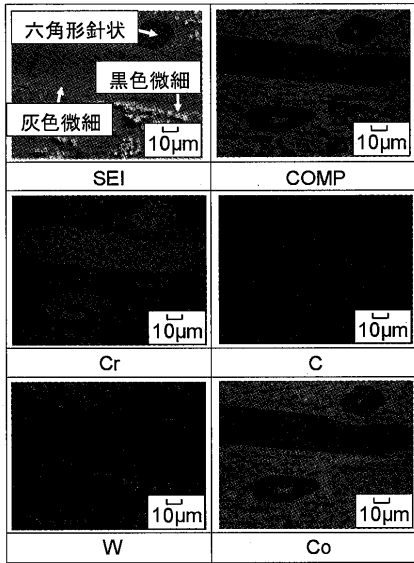


図6 MS No.190肉盛部のEPMA面分析

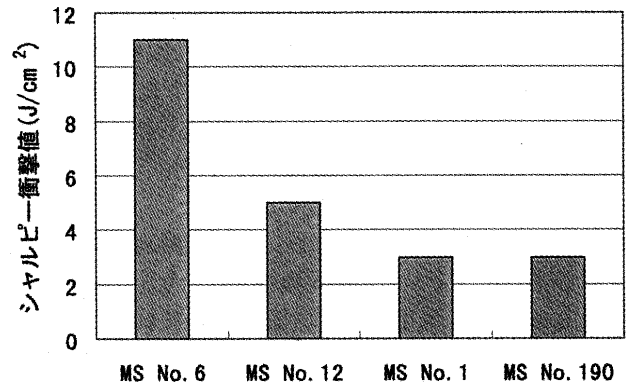


図8 各種MS合金肉盛部のシャルピー衝撃値

表2 TIG法によるMS No.6肉盛部の硬さおよび台金からのFe, C希釈量

合金の材質	層数	硬さ HRC	溶着層の成分	
			Fe (%)	C (%)
SS41	1	31-37	20-30	0.8-1.0
	2	43-45	8-12	1.0-1.2
SUS304	1	40-42	12-16	1.0-1.2
	2	45-46	5-7	1.1-1.25

表3 被覆アーク溶接時の適正電流範囲

棒径 (mmφ)	直流 (A)	交流 (A)
3.2	80-110	90-110
4.0	110-160	120-170
4.8	130-180	140-190

表4 TIG時の適正電流範囲

合金材質	棒径	3.2φ	4.0φ	4.8φ	6.4φ
軟鋼・低合金鋼		70-110A	90-130A	130-170A	170-220A
オーステナイト系ステンレス鋼		80-120A	110-140A	140-180A	180-230A

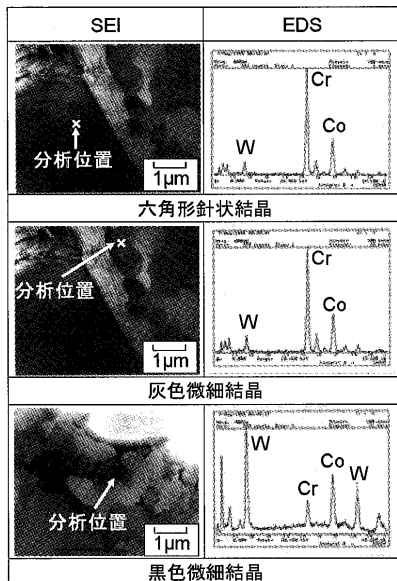


図7 MS No.190肉盛部のEDS結果

特集：トライボロジー

## 耐摩耗表面改質プロセスおよびその皮膜

谷 和美\*<sup>1</sup>  
TANI Kazumi

キーワード：耐摩耗，皮膜，炭化物，溶射，熔融塩，プラズマ溶接肉盛，気相成長

## 1. はじめに

トライボロジーとは摩擦，摩耗，潤滑などに関する現象あるいはその学問分野のことであると定義されている<sup>1)</sup>。機械部品に求められる性能の主要なものひとつに，その部品，部材が供用されて環境と相互作用しつつ，時間が経過して摩擦，摩耗が生じたとき，設計当初の形状精度の変化が許容範囲に収まっていることがあげられる。このような目的を達成するため，基材自体の耐摩耗・不変形性に代表される表面特性の検討が行なわれてきた。近年は基材とその表面部分を分離して表面改質によってトライボロジー特性を付与することがさかんにおこなわれるようになった。基材を構成する金属合金材料よりも高硬度で耐摩耗性に優れた材料が求められた結果，タングステンカーバイド複合材などの炭化物サーメット溶射皮膜の開発があり，要求対応は一気に加速した。硬質なうえ，皮膜の構造が緻密であり，研削仕上げ加工を施すと鏡面に代表される平滑面が容易に得られるようになった。またある範囲内であらさ値の制御が可能で，このような広範囲の表面あらさ供給能を有した炭化物サーメット皮膜は表面の摩擦特性付与，鏡面に代表される硬質平滑面の形成，長期維持などのトライボロジー特性の発現に寄与している。ここではドライプロセスに限定して表面の硬質化，耐摩耗，耐焼付きおよび潤滑化に寄与すると考えられる炭化物を主成分とする改質層を得るための表面改質技術について述べる，基材表面に基材とは異種の材料を被覆するものとして溶射法，プラズマ粉体肉盛溶接法および気相成長法を，また，基材の表面層自体を改質するものとして熔融塩浸漬法を取り上げて紹介する。

## 2. 耐摩耗表面改質プロセスの概説

ここで取り上げるドライプロセス表面改質技術の特徴を表1にまとめた。以下各論を述べる。

## 2.1 溶射法

溶射法は鋼などの素材で構成された機械，機器部材の表面に異なる材料特性を付加して外環境と接触する部分

の性質を改善しその表面機能を向上させるドライプロセスの代表的なものである。金属，セラミックスあるいはこれらの複合物などを高温のガス炎やプラズマ環境中に投入し，熔融または半熔融状態にして目的基材表面に噴射して皮膜を形成させるプロセスと定義される。この模式図例を図1に示す。溶射は皮膜化する材料を加熱することによって軟化，熔融させるので，プロセス構成の必須因子として何らかの熱源を要する。実用溶射法は燃焼ガス炎と熱プラズマを熱源および溶射材料の吹き付け駆動力としている。その熱源の種類によって溶射装置を分類することができる。現在，実用化されているほとんどの溶射法は電気エネルギーあるいは可燃性ガス燃焼炎を用いるものである。ガン内に陽極と陰極を設けてこれらに電圧を印加，発生させた電気アークにガスを供給してプラズマを発生させ，これをジェットとしてガン外に取り出して利用するのはプラズマ溶射ガン（DCプラズマ）である。

ガス炎熱源を用いるプロセスの代表的なものに高速ガス炎溶射法（HVOF）がある。ガン構造の分割化，冷却構造模索，投入エネルギーの高密度化などの点で開発が進行し，そして爆発溶射プロセスの専用領域にその役割を求めていった。その結果，およそここ20年のうちに自溶合金材料皮膜とは異なる低温溶射の分野で，炭化物サーメット材料溶射皮膜化のひとつの有効な工法として主要な地位を占めるに至った<sup>2)</sup>。近年では炭化物サーメット以外にNi-Cr系多元合金材料皮膜の形成プロセスとしての機能を獲得している。

溶射皮膜は皮膜材料の選択自由度の大きさ，実被覆加工にあたっての被加工物形状制限が少ないこと，成膜速度が大きいこと，形成皮膜の性状が多岐に富んでその用途との組み合わせによっては幅広い応用が可能なこと，などのプロセスの特徴がある。

## 2.2 熔融塩浸漬法

被処理基材を高温に保持した熔融塩浴中に一定時間浸漬保持することによって，熔融塩浴中にあらかじめ添加した炭化物形成元素（V，Nb，Cr，Tiなど）が被処理基材中のC（炭素）と接触するとその大きな親和性に

原稿受付 2007年7月10日

\* 1 トーカロ(株)溶射技術開発研究所

〒674-0093 兵庫県明石市二見町南二見14-3

表1 ドライプロセス表面改質技術の主要因とそれらの因子

		溶射法	熔融塩浸漬法	プラズマ粉体溶接肉盛法	気相成長法
改質方法		被覆	拡散層形成	被覆・溶着	イオン注入・被覆
層の硬質材		WC, Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub> , 複炭化物	VC, CrC	NbC	DLC
層の接合構造		粒子の機械的接合	基材との拡散層形成	基材との溶着	イオン注入または粒子の機械的接合
施工方法	環境	大気・不活性減圧雰囲気	熔融塩浸漬	大気・不活性ガスシールド	減圧
	温度	大気では室温～ほぼ200℃までに制御可, 不活性減圧雰囲気では高温処理も可能	塩浴温度(例: 1000℃)に従う	大気では室温～ほぼ200℃までに制御可	室温～ほぼ200℃までに制御可
基材に対するつきまわり		粒子の直線運動が基本で死角部位は検討が必要	3次元形状に対応可能	平面または円筒体外周に限定	制限は少ない
基材の条件	材質	金属, 樹脂など	炭素量0.3%超の鋼など	金属など	金属, 樹脂など
	形状・大きさ	大気では制限少, 不活性減圧雰囲気では処理容器の大きさによる	熔融塩処理槽の大きさによる	基本的に制限少	処理容器の大きさによる

よって結合して被処理基材表面に炭化物を形成する。これが基材内部からの拡散によるCの補給で成長して5～15μm厚さの層を形成する現象を利用したプロセスである。処理剤として硼砂(Na<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>)浴, 炭化物形成元素供給源のV<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 還元剤としてのAlなどで構成した熔融塩を用いるものは豊田中央研究所が開発したTDプロセスが典型的な実用例である<sup>9)</sup>。基材としては鋼, 鋳鉄, ニッケル合金, コバルト合金, 超硬合金などが用いられる。炭化物層形成が可能な基材中最低C量は, VCなどの場合は実用上0.25%程度である。生産技術的には処理時間と層厚さ, 炭素量を総合的に考慮するプロセスである。処理槽の例を図2に示す。

### 2.3 プラズマ溶接肉盛法

本法は金属, セラミックスおよびこれらの混合粉体をプラズマアーク中に供給して熔融させ, 金属基材上に溶着させて合金層を被覆する表面改質技術の一つである。図3にその熱源と成膜現象を模式化して示す<sup>4)</sup>。パイロット電源によってタングステン電極(-)と水冷ノズル(+)の間にアークを生じさせ, アルゴンなどの動作ガスを供給してプラズマを発生させる。これは非移行型プラズマアーク: Plasma Non-Transferred Arcと呼ばれる。この高温のプラズマガスを水冷ノズル先端の小孔を通して絞り, 熱的ピンチ効果を与えてエネルギー密度の高いプラズマアークとして基板(被加工物)に到達させる。アークが基板に到達するとこの状態を持続させるために主電源が作動し, アーク電流が基板中を流れるようになる(移行型プラズマアーク: Plasma Transferred Arc)。

その結果, 基板表面が熔融し“熔融池”が形成される。肉盛材料となる粉末はアルゴンなどの搬送ガスを用いてプラズマアーク中に圧送され, 熔融池に投入されて合金層として凝固する。基板と冶金学的に接合した状態が得られるのが特徴である。

### 2.4 気相成長法

表面改質の要求によっては, 10μmを超えないような薄膜が適用される場合がある。膜の化学種によっては大気中で成膜させにくいものが存在する。また数10μmの大きさの粒子を飛行・衝突させて基板上に積層させて得られる皮膜では, その内部に粒子境界, 気孔などが存在する。このような皮膜の被覆では, 基板を環境から遮断することは困難な場合が多い。一方, 低圧力環境下で生成させた種々のガス, イオンを基材表面に沈積させて基材とは異なる材料層を付与させることが行なわれる。これらは真空蒸着, スパッタリングなどのプロセスを基本に工業化の道を進んできた<sup>6)</sup>。本稿では気相成長法で得られるトライボロジー膜をダイヤモンドライクカーボン(以下DLCと呼ぶ)膜に焦点を絞ることにする。DLCの合成法としては, CVD法(RFプラズマCVD, マイクロ波プラズマCVD法, ECRプラズマCVD法など), PVD法(マグネトロンスパッタ法など), ターゲットとなる炭素をイオンビーム, アーク, パルスレーザーなどのエネルギー源で気化させ炭素蒸気を基板に輸送するものなどが報告されている<sup>6)</sup>。図4に容量結合型プラズマCVD装置の概念図例を示す<sup>7)</sup>。

3. 表面改質プロセスによって得られる改質層の特性

3.1 材料をトライボロジー用途に用いるときの考え方

表面の摩耗，摩擦特性の付与にしばしばかかわっている表面改質層の良い例としてWCサーメット溶射皮膜が挙げられる。とくに耐摩耗性，形状不変性，真実接触面積の低減化にすぐれた材料を基材表面に形成して表面の粗さを与える有効なプロセスのひとつとして用いられている。ここではWCサーメット溶射皮膜を例に述べる。

3.1.1 表面粗さ付与における溶射皮膜の役割

溶射は硬質粒子を表面に吹き付けることができるので，表面処理プロセスのなかでもあかさ付与を容易に行うことができる。金属線を溶射材料として用いる溶線式法では形成した皮膜の表面粗さを直接用いる。また，粉末材料を吹き付ける場合，出発粉末の粒度を調整することによって，ある範囲の表面粗さを得ることができる。プラ

ズマ溶射や高速フレイム溶射プロセスではこの手法がよく用いられる。めっき法を用いたダルめっき皮膜は基材の表面粗さをあらかじめ調節したうえで，めっき皮膜をその上に形成し粗さを創生する。溶射法ではしばしば形成した皮膜固有の粗さをそのまま用いる場合がある。

3.1.2 表面粗さの制御

1) 基材粗さの調整

溶射皮膜を被覆した基材の表面粗さは基材，溶射皮膜双方の粗さが重なったものである。溶射皮膜の粗さが基材粗さに比べて大きいときは溶射皮膜の粗さが表面の粗さを支配する。このように考えると基材の表面粗さのおよぼす影響は小さいようであるが，条件によってはそうではない。基材に溶射し，鏡面に仕上げるときを考える。このとき出発基材表面が鏡面条件で与えられる場合はほとんどない。これは溶射皮膜の粗さが基材粗さに比べて

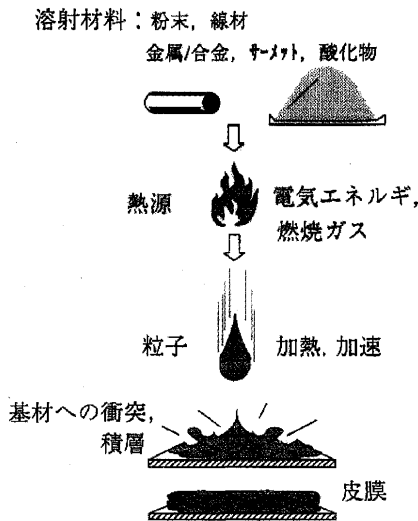


図1 溶射プロセスの概念を示す模式図

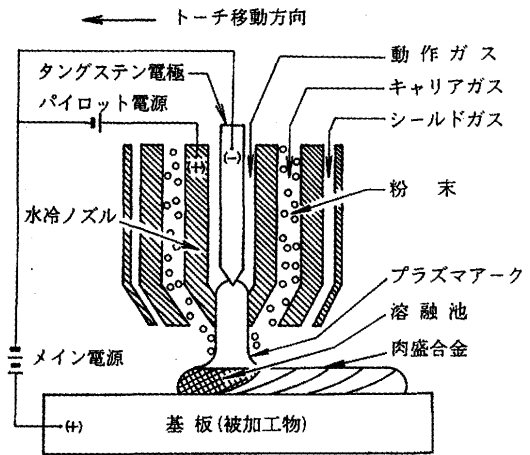


図3 PTA熱源と成膜現象を示す模式図

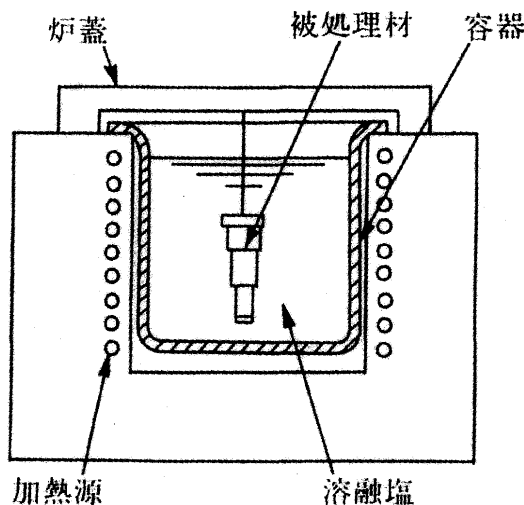


図2 熔融塩処理槽の例

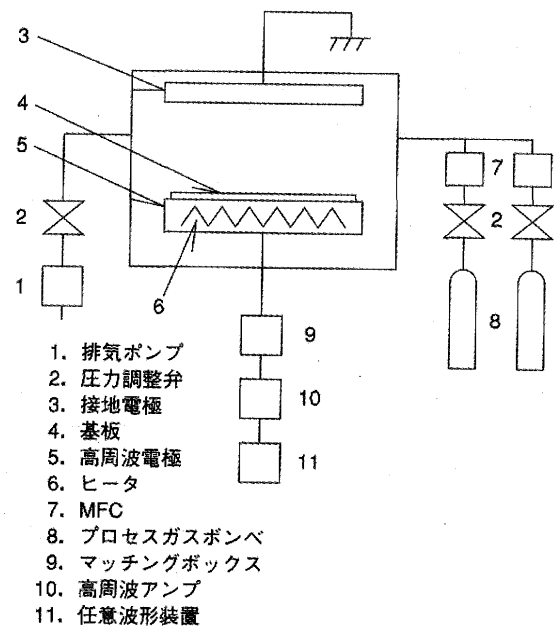


図4 容量結合型プラズマCVD装置概念図

はるかに小さい場合である。この場合は基材表面の粗さが溶射皮膜の粗さに影響する。

## 2) 基材硬さのおよぼす影響

これまでに記述したように溶射皮膜は基材に対する機械的投錨作用で付着している。いっぽう、機械構造物材料はそれが使用される機械機構に応じた強度と硬さが設計上与えられており、このような基材に溶射皮膜を被覆するときは基材硬さをつねに考慮しなければならない。

さて、基材硬さが低い場合、プラスト粗面化処理で基材表面粗さを大きくしておいて溶射皮膜形成する溶射皮膜の粗さを基材粗さが増幅した粗さが得られる。このように基材硬さは最終表面粗さにおよぼす影響が大きい。

## 3) 溶射皮膜のもつ固有の表面粗さ

溶射プロセス、溶射材料および両者の組み合わせによって、形成された溶射皮膜の表面粗さはさまざまな値をとる。溶射皮膜そのものの表面粗さを皮膜固有の粗さと呼ぶことがある。溶射飛行現象でどのような大きさの溶融、軟化粒子が存在しているかによって積層形成した皮膜の固有表面粗さが決まる。ガス、電気溶線式溶射皮膜は線材を溶射炎のエネルギー自体で溶滴化するので、そのプロセス上固有粗さは大きい。粉末式フレーム溶射皮膜は再溶融した後、研削加工して用いることが多いので皮膜の固有粗さはあまり求められない。高速フレーム溶射、プラズマ溶射では出発粉末材料の粒度を選択できるので皮膜固有粗さもある範囲で変化させることができる。

## 4) 溶射皮膜表面粗さの制御

粗さは基材硬さ、溶射プロセス、材料、プラスト粗面化条件、研削、ラップなどの除去仕上げ加工条件、除去仕上げ加工後の再粗面化処理加工などを組み合わせて制御することができる。その結果、ダルから鏡面まで幅広く粗さ値を得ることができる。

## 3.2 炭化物系溶射皮膜の例

正しくは炭化物複合材皮膜というべきであるが、通称、炭化物サーメット皮膜と呼ばれている。炭化物は、一般に硬さが大きいことが知られており<sup>9)</sup>、粉末冶金法の進歩と呼応して難変形耐摩耗皮膜としての実用化が試みられてきた。現在のところ、溶射皮膜としての実用材はWCサーメットとCr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>サーメットのほぼふたつに絞られる。これらの主要材は、耐摩耗性、環境条件としての耐食性、高温での炭化物安定性などの性能均衡を考慮して実用選定することが求められる。WCサーメットはその原料粉末実用材料の生産に対して粉末冶金分野の多大な成果が適用されている。結合相は金属Coを始めとして、金属Cr、Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>、Niなどが実用材となっている。サーメットにおける金属成分結合相の選択条件は極めて重要である。これらの結合相は金属状態で存在するほか、複炭化物として存在することがある。例えばWC-12mass%Co系では全カーボン量を化学量論組成から減少させるとCo<sub>3</sub>W<sub>3</sub>Cなどの複炭化物が生成する。図5<sup>9)</sup>に

この一例を示す。これらの複炭化物を含むサーメットは皮膜の基材への密着力、硬さ、脆性などをほとんど低下させることなくWC-12Co系溶射皮膜として実用することができる<sup>9)</sup>。WCサーメットはWCの熱力学的特性<sup>10)</sup>から、大気中では常温とその近傍の温度環境で使用される。また、水溶液環境下での耐摩耗用途に供するときは、炭化物および結合相成分を考慮して成分設計される。例えば、中性からアルカリ性域ではCrの添加によって、自然電位の卑化とアノード分極時の不動態保持電流密度の低減化が実現できる。炭化物サーメット皮膜の耐水溶液腐食性については、高谷らの電気化学的手法による速度論的研究があり、皮膜適用に際しての有効な指針を提供している。一般に材料の耐食性を評価する場合腐食質量減を求めることが基本であるが、高谷らによれば、腐食質量減を捉える溶液分析から得た腐食電流と例えば交流インピーダンス測定などの電気化学的手法から得た腐食電流の間のよい相関が見出されており<sup>10)</sup>、溶射皮膜の耐用寿命予知に有効な指針が与えられる。図6にこの結果を示した。高温領域での耐摩耗性付与にはクロムカーバイドサーメットが賞用される。通常は大気プラズマ溶射法が用いられる。そのほか著者らは高速ガス炎溶射法あるいは減圧プラズマ溶射法を用いた皮膜形成を試みた<sup>10)</sup>。減圧プラズマ溶射法によれば、減圧チャンバー内で基材温度を高温にしつつ皮膜を被覆形成できる利点がある。粒子境界の整合性も大気プラズマ法に比べ明らかによい。高温硬度の低下も抑制されている。図7は、微小硬度変化を他の高温供用材料と比較した例である。高温環境での飛来粒子に対する耐エロージョン性に優れ、例えば、ナフサを主原料として輻射部を800~840℃、圧力約0.1MPaに設定したエチレン製造装置用分解炉に配設される耐熱ステンレス鋼製熱電対保護管に対する被覆手段として実用されている<sup>10)</sup>。WCサーメット溶射皮膜ではピッカース硬さ1100を超える鏡面を得ることができる。これらの鏡面は表面処理鋼板、紙、フィルムなどの基礎資材製造設備におけるプロセッシング、搬送・案内ロールとして多用されている。

## 3.3 溶融塩浸漬法で得られる炭化物皮膜の例

これまでに鋼、鋳鉄、ニッケル合金、コバルト合金などを基材としてVC、TiC、NbC、Cr-Cなどの炭化物皮膜が形成可能であることが報告されている。

VC皮膜の室温-高温-室温の繰り返し熱履歴に対する高温硬さ変化を熱処理鋼材との比較で図8<sup>9)</sup>に示した。一度高温にさらされても室温まで冷却されると再びもとの値に近い硬さが得られる。高温硬さを得る目的で、ソリッドステライトに代表されるCo基合金が用いられているが、SKD61などの工具鋼にVC皮膜を施せば高温域における耐摩耗性の発揮が期待できる。

3.4 炭化物-合金複合肉盛層の例

金属マトリックス中に分散した炭化物などの非金属粒子は相手材料との凝着を起こしにくくする効果があることが知られている<sup>10)</sup>。炭化物のうちNbCは水溶液中での耐食性に優れ、不動態挙動も安定しているので工業材料としては特徴あるものである。しかし質量が小さいので金属合金を結合材としたサーメットを作製したとしても既述したWCサーメット、Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>サーメットのように溶射法での有効な被覆層はこれまでのところ開発されていない。ところが、図9に示すように炭化物単体でみると

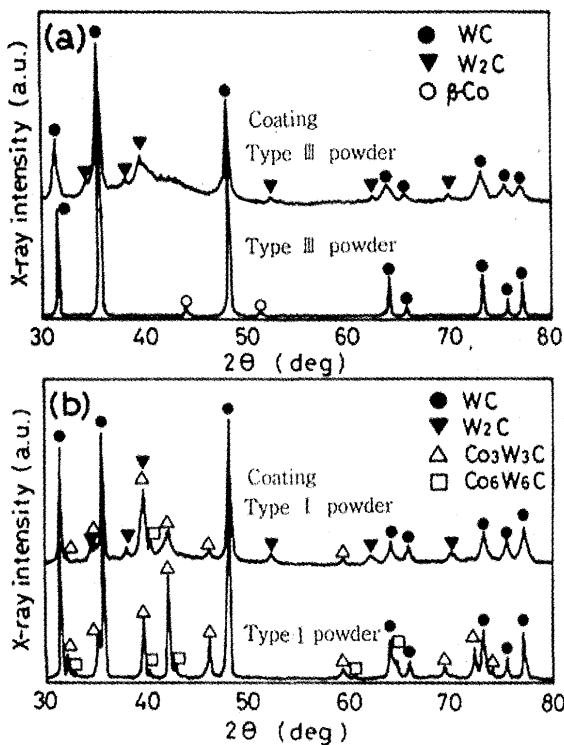


図5 WC-12Co溶射粉末に存在する相の状態例

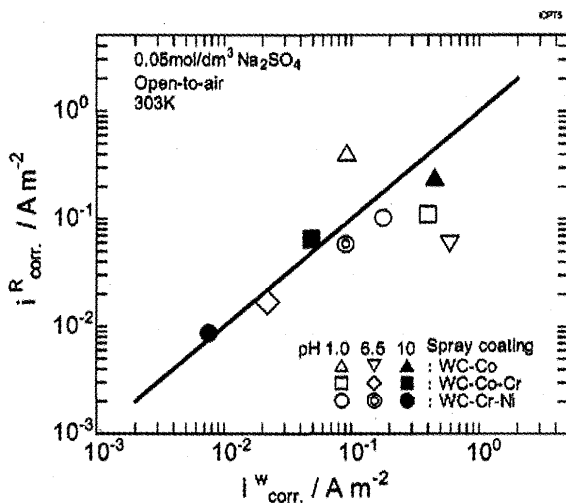


図6 電気化学的インピーダンス法により求めた腐食電流 ( $i^R_{corr}$ ) と溶出イオン量から求めた腐食電流 ( $i^W_{corr}$ ) の関係

NbCはWCなどのほかの炭化物に比べ耐水溶液腐食性に優れる<sup>10)</sup>ので、湿潤環境下での摺動など耐摩耗性が要求される場合では、NbC-合金複合材が使用される場合がある。富田らはプラズマ粉体溶接肉盛法を用いてNi-Cr-Fe合金中に粒径100  $\mu$ m前後のNbC炭化物を分散させた複合材料層のすべり摩耗挙動を調べている<sup>10)</sup>。

図10にNbC粒子を分散させた肉盛合金層の比摩耗-すべり速度曲線におよぼすNbC含有量の影響を示す。なお相手材はピッカース硬さ750のSUJ2鋼である。NbC配合量が50Vol%以上では比摩耗量はNbC無添加肉盛合金の1/10~1/100であり、相手材も大きな摩耗を生じない。特に、NbC配合比が60Vol%ではステライトNo6合金よりも耐摩耗性が優れていることが報告されている。

また、硬質金属間化合物である Laves相を分散する Co-Mo-Cr合金材料も特殊な耐摩金属層であり、プラズマ粉体溶接肉盛法を用いて被覆層とすることができる。

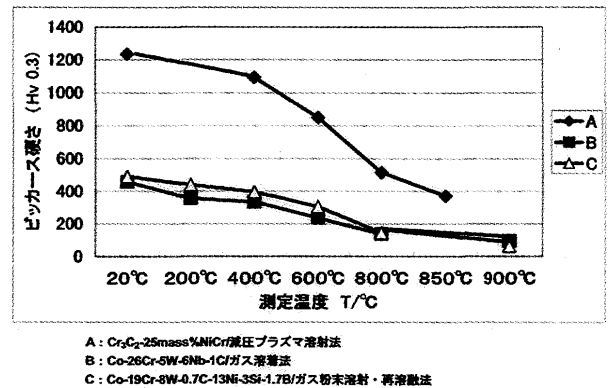


図7 Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-NiCr減圧プラズマ溶射皮膜の高温における微小硬度変化

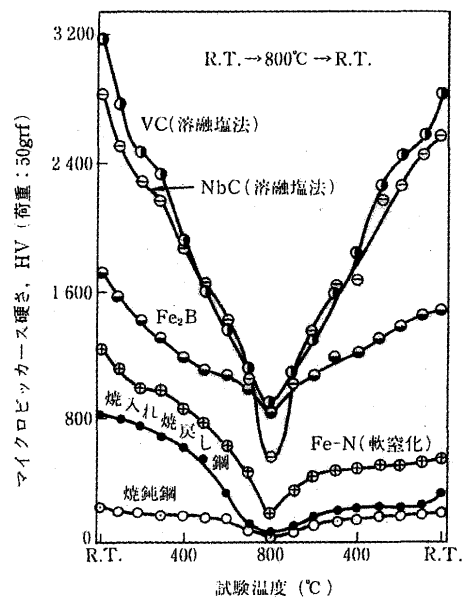


図8 溶融塩浸漬処理皮膜と鋼材の高温硬さの比較

3.5 ダイヤモンドライクカーボン (DLC) の例

高い硬度を有し、低摩擦係数を示すとともに低分子透過性をもつ薄膜皮膜としてよく知られているのがDLCである。ただし、溶射皮膜、めっき皮膜といってもその種類が数多くあるように、DLCにもさまざまな形態、性能が存在する。DLCの定義は簡単ではない。総括的に表現するならば、ダイヤモンドからグラファイトに至る性能(機能性)を持ち、水素を含む3次元的構造を有し、結晶性からアモルファスの特性を備える合成材料といえる。DLCはカーボン、水素を基本形成元素とし、これらに必要な応じてSi,Fなどの他特性を付与する元素を加えた複合材料と考えることができる。また、古くから固体潤滑性を有する材料として知られてきたグラファイトに、炭素原子の取る電子結合状態 $sp^3/sp^2$ の比率および水素の含有量制御によって硬さの特性を重畳させた材料であるともいうことができる。表2に川名<sup>8)</sup>がまと

めた各種DLC成膜プロセスとその皮膜特性の一部を示した。ここで取り上げるのは多岐にわたる特性のうち高い硬度を有し、低摩擦係数を示すものに絞る。トライボロジー用途にDLCを適用するときの留意点は少なくとも二つあると考えられる。まず、膜の特性である。よく知られているように出発原料のカーボンソース特性で膜の微小硬さが変化することである。これは水素の含有量が硬さのひとつの支配要因であることによる。炭化水素ガスとするか固体カーボンとするかは各種成膜プロセスにより決定される。耐摩耗性、基材への密着特性など要求される条件を精査したのち求められる膜特性が得られるプロセスを選択することが重要である。次に基材形状

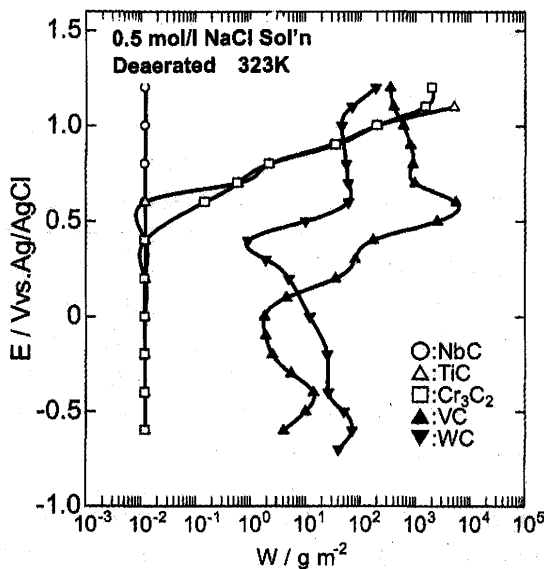


図9 塩化ナトリウム水溶液中における炭化物の耐食性

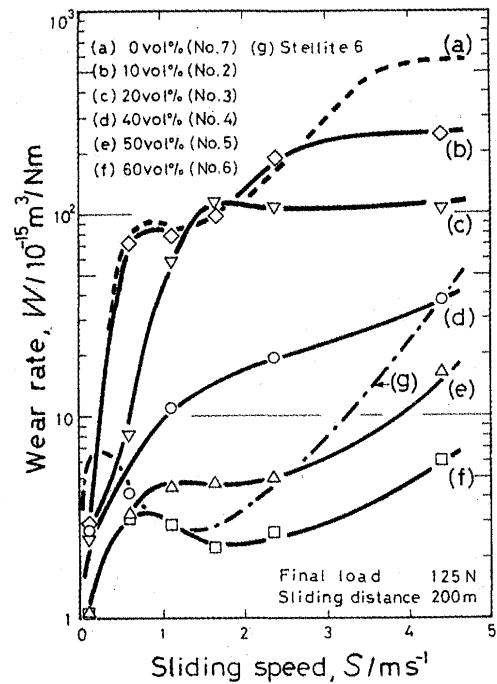


図10 NbC粒子を分散させた肉盛合金層の比摩耗量 - すべり速度曲線におよぼすNbC含有量の影響

表2 各種DLC成膜プロセスとその皮膜特性

比較項目	成膜原理	イオン源方式	カソードアーク方式	プラズマCVD方式	UBMスパッタ方式
成膜原料		$C_6H_6$	固体カーボン	$C_2H_2$ または $CH_4$	固体カーボン又は $CH_4$
成膜温度, °C		200~300	200以下	200以下	250以下
膜組成		水素含有	水素フリー	水素含有 Metal含有	水素フリー 水素含有 Metal含有
中間層		メタル なくても可	施工しない	メタル、炭化物	メタル
摩擦係数		0.1~0.2	0.1以下	0.1~0.2	0.1~0.2
NHT硬さHV		1500~2500	2000~4000	1000~2500	1000~2000
表面粗度		○	△	◎	○
密着力		◎	○	◎	◎
量産性		○	△	◎	◎
その他特徴		・PVDイオンプレーティングに近い	・治具の冷却必要 ・ドロップレット対策(フィルタードアーク、薄膜化)	・RF方式ではプラスチック、セラミックスに成膜可能 ・量産部品実績	・他物質(MoS2等)との複合可能



に対する均一成膜性があげられる。これは溶射法のようにプロセスの特性の影響をうける。スパッタ方式は飛行粒子の運動が直線的であり、死角にあたる場所の膜形成速度が著しく低下する。RFプラズマCVD法などでは本来のCVD法のように基材を取り巻く雰囲気全体からの粒子を積層できるので3次元基材に対してもかなりの膜厚均質性が得られることが多い。

#### 4. おわりに

トライボロジー特性を担う硬質皮膜、表面改質層のいくつかについて、その形成プロセスとともに概説した。主として炭化物から構成された層であるが、炭化物そのものの特性、基材との接合関係、形成する対象となる基材の大きさ、形状などの許容条件、被覆加工が基材特性の変化におよぼす影響などの検討因子を多く含む。実際の適用にあたっては、基材-皮膜系と接触する環境要因との相互作用をよく検討したうえでこれらの改質層を適宜選択することが望ましい。

#### 参考文献

- (1) 例えば、松原 清, トライボロジー-摩擦・摩耗・潤滑の科学と技術-, (1991), 産業図書.
- (2) 谷 和美, 最近の高速ガス炎溶射, 溶接技術, 2000-9, pp.75-79.
- (3) 豊田中央研究所研究報告TR28, 溶融塩浸漬による炭化物被覆法-TDプロセス-, (1983), p.18.
- (4) 富田友樹, 大阪府立大学博士学位論文, (1994).
- (5) 例えば、伊藤 毅, ドライコーティングプロセス技術の現状と今後の課題, 製鉄研究, 336 (1990), pp.1-6.
- (6) 齊藤秀俊監修, DLCハンドブック, エヌ・ティー・エス, 2006, p.8
- (7) 化学工業会編, CVDハンドブック, (1991).
- (8) 例えば、榛葉久吉: “粉末冶金学”, コロナ社, (1971), 101.
- (9) 例えば、富田友樹, 高谷泰之, 小林圭史, 中平 宏, 原田良夫, 溶融純亜鉛中におけるWC/Coサーメット溶射皮膜の耐久性, 鉄と鋼, 78-4, (1992), p.100.
- (10) 例えば、谷 和美: 溶射技術, 9-4, (1990), p.57.
- (11) 高谷泰之, 富田友樹, 谷 和美, 原田良夫, WCサーメット溶射皮膜の腐食速度, 材料, 48-11, (1999), pp.1249-1254.
- (12) 富田友樹, 高谷泰之, 谷 和美, 原田良夫, VPS法ならびにHVOF法で作製したCr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-NiCrサーメット溶射皮膜の硬さとミクロ組織, 高温学会誌, 26, Supplement (2000), pp.248-254.
- (13) 日本特許第3630282号.
- (14) 中沢洋二, 金属表面技術, 31-2, (1980), p.69.
- (15) 竹内栄一, 鉄と鋼, 73 (1987), p.242.
- (16) 高谷泰之, 富田友樹, 原田良夫, 塩化ナトリウム水溶液中に置ける各種炭化物の腐食挙動, 材料, 41, (1992), p.1348.
- (17) 富田友樹, 高谷泰之, 橋詰源蔵, 原田良夫, NbC粒子分散Ni-Cr-Fe肉盛合金のすべり摩耗特性, 日本金属学会誌, 54 (1990), pp.664-670.
- (18) 川名淳雄, トライボロジー, 21-5, No.237, (2007) p.50.

特集：トライボロジー

# 耐摩耗用 MSCoating

大寺 一生\*<sup>1</sup>  
OOTERA Issei

落合 宏行\*<sup>1</sup>  
OCHIAI Hiroyuki

渡辺 光敏\*<sup>1</sup>  
WATANABE Mitsutoshi

吉澤 廣喜\*<sup>1</sup>  
YOSHIZAWA Hiroki

キーワード：ジェットエンジン，表面处理，MSCoating，放電，耐摩耗，補修，Co基合金，燃焼器，タービン  
Jet Engine, Surface Treatment, Electro Discharge, Anti Wear, Repair, Co Base Alloy, Combustor, Turbine

## 1. はじめに

ジェットエンジン部材はその部位によって要求される使用温度や材料強度などが変わることから，その部位に要求される機能に合わせてNi合金，Ti合金など様々な材料が使用される。

一方，エンジン部材に対しては使用温度や強度といった機能だけではなく，使用環境による劣化も考慮する必要がある。そして，環境による部材の劣化を防ぐためにしばしば使用されるのが表面处理である<sup>(1), (2)</sup>。

使用環境によって，摩耗，エロージョン，腐食，酸化など劣化を引き起こす原因は様々である。それらに対し，必要な機能を付加するため，適切な表面处理を選択する必要がある。その結果，塗装，メッキ，溶射，拡散コーティング，肉盛溶接など，エンジン部材に対しては，その目的に合わせ多種多様の表面处理を施されることになる（図1参照）。

ところが表面处理は，その方法によって，洗浄，マス

キングやショットブラストといった前処理や，マスキング除去，熱処理といった後処理が必要となる。さらに，使用温度や部材への影響，また部品形状によって，適用できる表面处理方法に制限をうける。このように，エンジン部材に幅広く適用されている表面处理であるが，問題点も多い。

そのような背景の中，弊社が三菱電機株式会社と共同で開発した表面处理技術がMSCoatingである。放電加工の原理を利用した本技術は，マスキングなしに局所的なコーティングを可能とし，母材への影響もわずかであることから，エンジン部品への幅広い適用が期待されている。

## 2. MSCoatingの原理と特徴

### 2.1 MSCoatingの原理

先に記したように，MSCoatingは放電加工の原理を利用したコーティング技術である。放電加工が電極を使用して加工を行うように，MSCoatingではコーティングブ

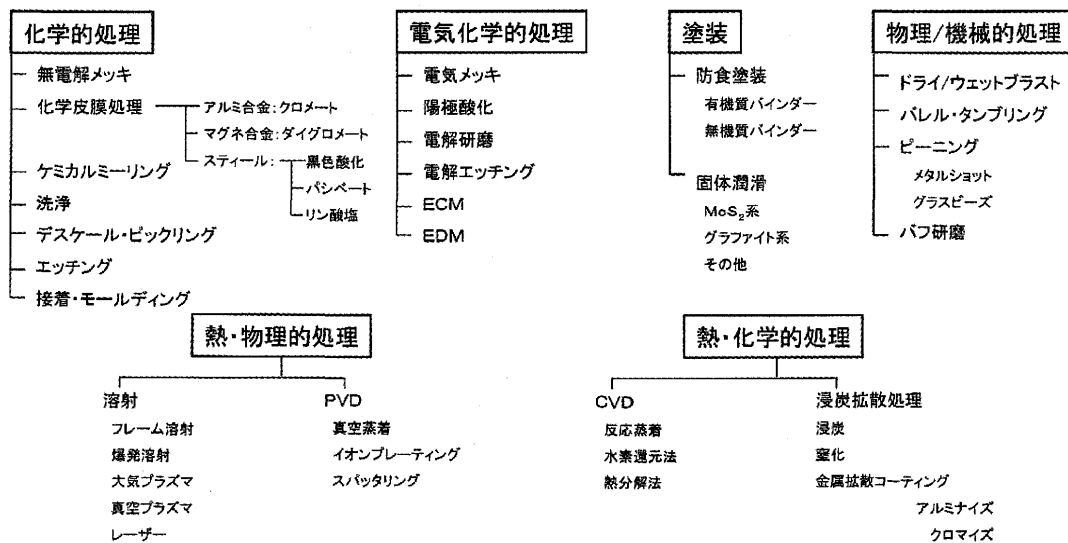


図1 エンジン部品の加工において使用される表面处理

原稿受付 2007年 7月23日

\* 1 (株) I H I 航空宇宙本部 技術開発センター  
〒196-8686 東京都昭島市拝島町3975-18  
I H I 昭島ビル

ロック（以下C/Bと表記）と呼ばれる、粉末を固めたものを使用して処理を行う。

このC/Bと被処理材を絶縁油の中に入れ、電圧を加えることで、C/Bと被処理材との間にパルス状の放電（毎秒約1万回）を発生させる。このパルス放電によりC/Bを形成している粉末が溶融した状態で一部分離し、被処理材に付着する。このパルス放電が繰り返し行われることにより溶融・分離したC/B粉末が被処理材上に付着・堆積し、コーティングを形成する。<sup>(3),(4)</sup>（図2参照）。

2.2 施工上の特徴

このように、C/B粉末の溶融・付着によりコーティングが形成されることから、施工範囲はC/Bの形状により決定される。そのため、C/Bの位置を施工したい位置に合わせる、もしくはC/Bを施工したい形状に整形することによってマスキングは不要となる。図3は実際のコーティング例であるが、C/Bの整形のみであり、マスキングや処理後の加工は一切行っていない。

また、MSCoatingでは、直径がマイクロレベルの微細なパルス状放電が局所的に起こることにより溶融接合するため、母材への影響は約10 $\mu$ m程度の表面においてのみとなり、溶接で生じるような母材の変形もない（図4、

5参照）。加えて、加工設備は大規模ではないため、インライン加工が可能であること、プログラム制御による加工であることから、作業者の技能を必要としないという利点もある。

2.3 C/B材質および加工による違い

MSCoatingにおいては、C/B粉末の材質により形成されるコーティングの性質が変わる。例えば、TiCのようなセラミックスコーティングを形成する材料の粉末をC/B材に選ぶ場合は、20 $\mu$ m厚さ程度の薄膜コーティングが形成される（図6参照）。形成されたコーティングはビッカース硬さにして1000HV以上の硬質なものとなるため<sup>(4)</sup>部品寸法に影響を及ぼさず、局所的に部品硬度を上げたい場合に有効といえる。

一方、金属粉末をC/B材に選ぶ場合は、最大で5mm程度の厚肉盛が可能になる。さらに、加工条件を調整することで、コーティングの緻密さが変化する（図7、8参照）。この加工条件による緻密さの変化は、一回のパルス放電における粉末の分離量に起因すると考えられる。

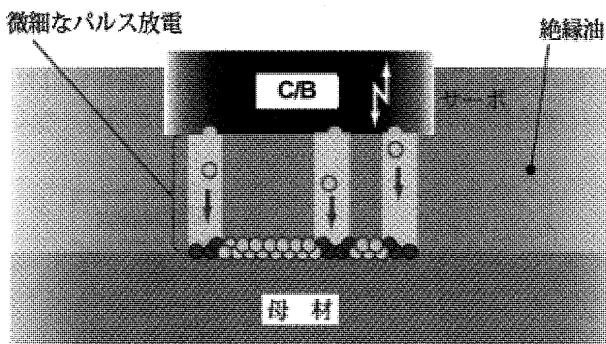


図2 MSCoatingの原理

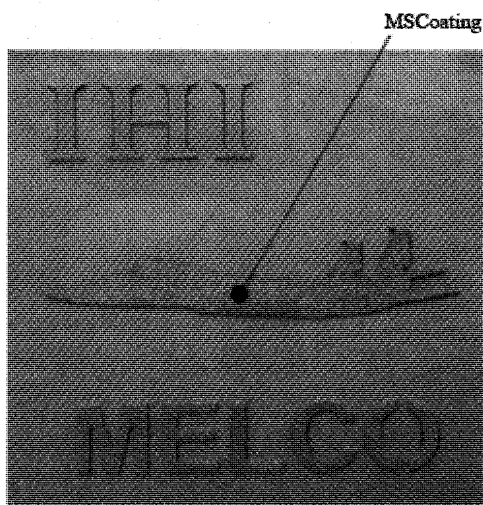


図3 C/B形状が転写された例

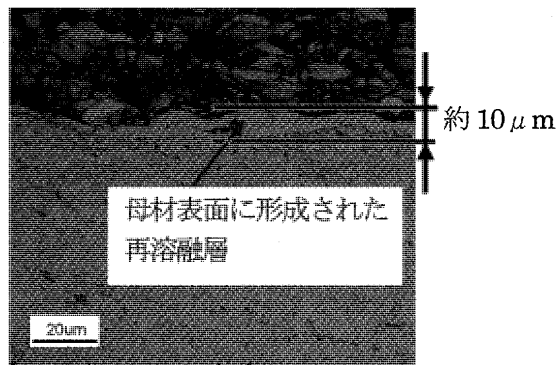


図4 母材表面に形成された再溶融層

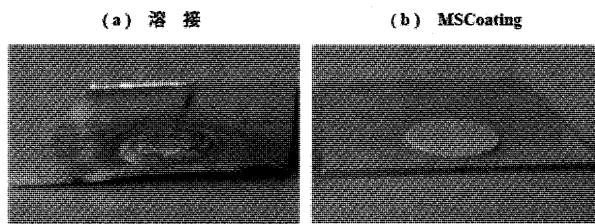


図5 溶接との変形の比較

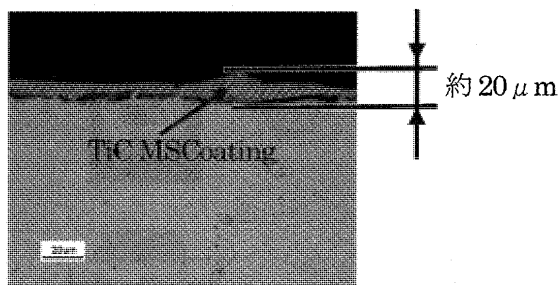


図6 TiC MSCoatingのマイクロ組織

つまり、粉末の分離量を抑える条件にすると、個々の粉末に対する入熱量が大きくなるため、粉末が十分に溶融した状態で被処理材に付着・堆積し、緻密なコーティングが形成される。一方、粉末を多く分離させる条件にすると、個々の粉末に対する入熱量が小さくなるため、半

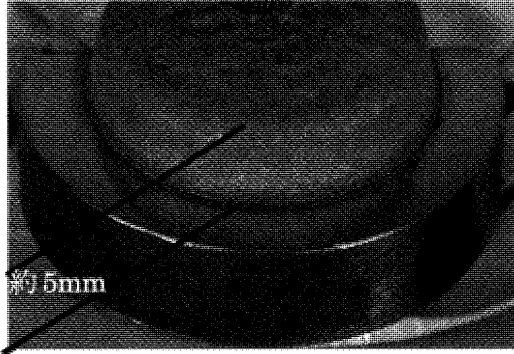


図7 金属MSCoatingの厚肉盛

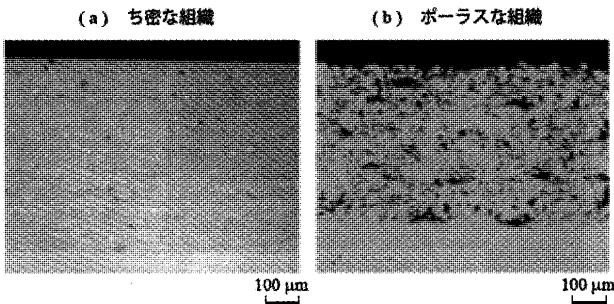


図8 MSCoatingによる金属の肉盛組織

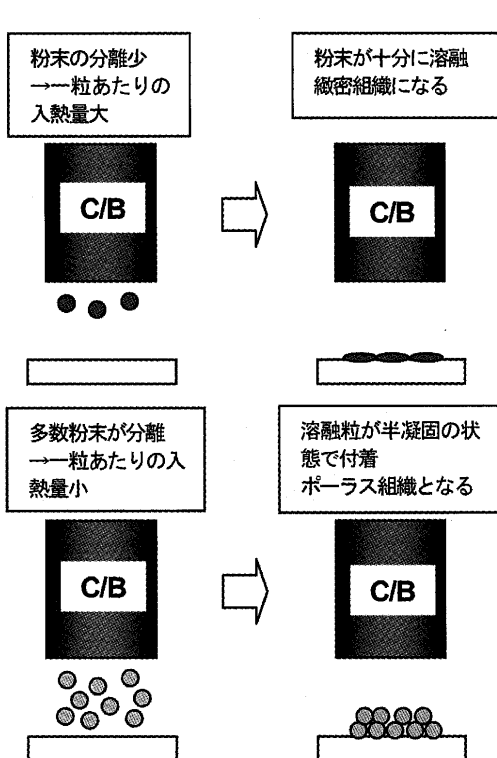


図9 加工条件とコーティング組織の関係

凝固の状態で被処理材に付着・堆積し、ポーラスなコーティングとなる (図9参照)。

### 3. 耐摩耗用MSCoating

#### 3.1 MSCoatingの適用部位

前項に示すように、MSCoatingはC/B材質、加工条件によって様々な機能を付与することが可能であるが、現在、最も注力されているのが耐摩耗用MSCoatingのジェットエンジン部材への適用である。

エンジン中では、耐摩耗用あるいは摩耗部位の補修用として、さまざまな部位に表面処理が施されている。図10にその一例を示す。その中でも、MSCoatingの適用の可能性が高いのは、タービンあるいは燃焼器といった高温部位である。

この部位は従来、主に肉盛溶接や溶射が適用されているが、適用する上で考慮が必要な点も多い。肉盛溶接の場合、母材への熱影響や変形が懸念される、母材厚さによっては加工できない部位が存在する、タービン部位に多く使用されているNi基合金は溶接性が悪く、また後加工や後熱処理が必要となる、などのため注意が必要である。また溶射の場合、マスキング (及びその除去) を必要とする等、前後処理が求められる。

これに対し、変形など母材への影響がほとんどない、肉盛溶接や溶射が施工できないような位置においても容易に局所的なコーティングができる、前後処理を必要としない、といった利点をもつMSCoatingは、耐摩耗用あるいは摩耗部位の補修用として、幅広い適用が期待される<sup>19)</sup>。

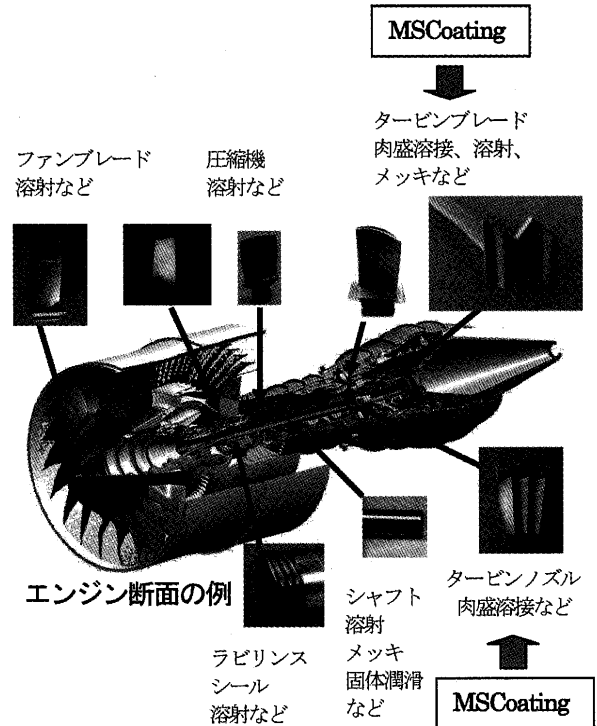


図10 エンジンの各部位において使用されている耐摩耗用および補修用表面処理例

3.2 耐摩耗性の比較

高温部位においては、例えばTribaloy®800やCoast Metal®64といったCrを含むCo基合金が耐摩耗用、あるいは摩耗部位の補修用に使用されていることから<sup>6)</sup>、MSCoatingにおいても、Crを含むCo基合金を耐摩耗用材料として使用している。

耐摩耗用材料としてエンジン部品に使用実績のあるCo基合金の肉盛溶接（以下溶接と表記）と、MSCoatingとの耐摩耗性比較を行った。

3.2.1 フレッシングウェア試験

まずフレッシングウェア試験の結果を示す。本試験では、図11に示すような、微小な摺動の繰り返しにより起こる摩耗に対する特性を確認した。実際の試験条件を表1に示す。また、試験結果を図12に示す。

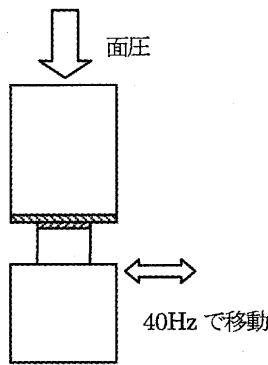


図11 フレッシングウェア試験の模式図

表1 フレッシングウェア試験条件

面圧	3-7 MPa
振幅	±0.5mm
速度	40Hz
温度	RT-930°C
試験実施サイクル	1,000,000 サイクル

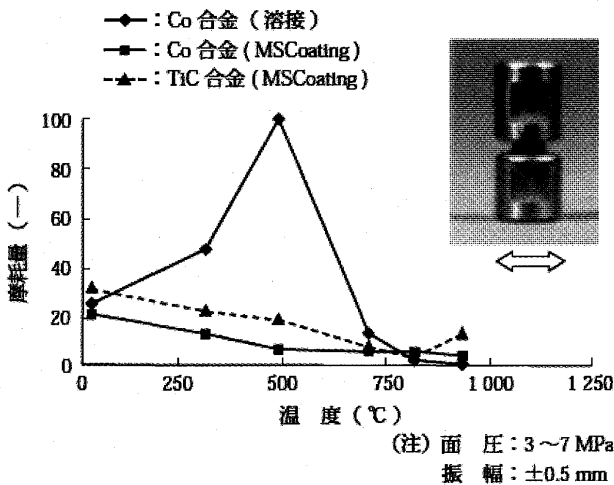


図12 フレッシングウェア試験結果

試験結果から分かるように、室温から900°C近い高温までの幅広い範囲において、溶接と比べ、MSCoatingは同等もしくは良好な結果を示している。特に、500°C近辺の中温域においては、非常に良好な結果となっている。

3.2.2 インパクトウェア試験

次にインパクトウェア試験の結果を示す。本試験は、図13に示すように、衝突→摺動の繰り返しにより生じる摩耗に対する特性を確認するものである。実際の試験条件を表2に示す。また、試験結果を図14に示す。

本試験においても、部品の適用温度域である中温域から高温域にかけては溶接と比べ同等以上の良好な結果を示している。

3.3 耐摩耗性に対する考察

前節の結果から、特に中温域においては、MSCoatingが通常使用されている溶接と比べ、明らかに良好な耐摩耗性を有していることが分かる。しかし、使用材料は

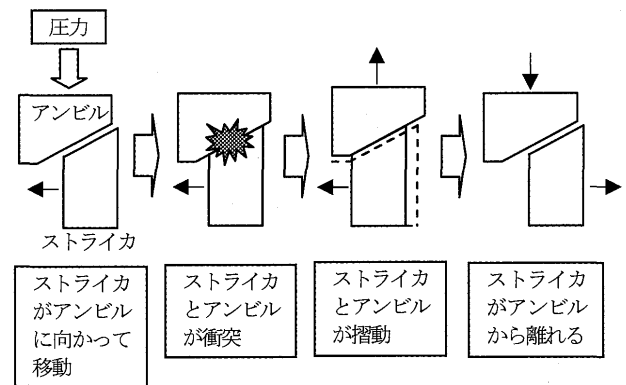


図13 インパクトウェア試験の模式図

表2 インパクトウェア試験条件

面圧 (静止時の接触面圧)	3-7 MPa
振幅	±0.5mm
速度	34Hz
温度	RT-815°C
試験実施サイクル	1,000,000 サイクル

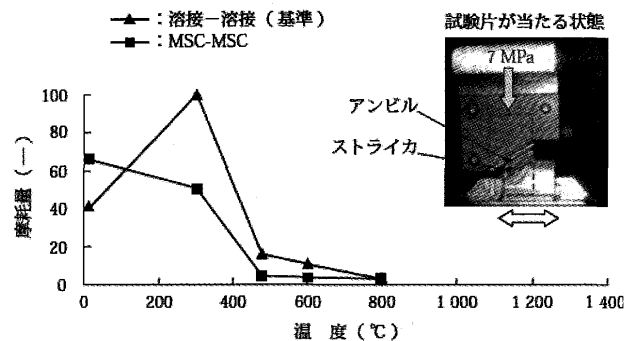


図14 インパクトウェア試験結果

Crを含むCo基合金であり、従来から使用されているものと大きく変わるわけではないことから、MSCoatingによる耐摩耗性の向上は、材料の違いではなく、処理方法に起因することが想像される。

一方、材料組織に着目すると、試験に供試されたMSCoatingの組織は図15に示すような粒が堆積したような状態になっており、粒と粒の間には微粉が詰まっている。それに対し、溶接組織は図16に示すような通常の金属同様の緻密組織であることから、材料組織の違いが耐摩耗性の差につながっていると推測される。つまり、特に中温域においては、図17に示すように、MSCoating中に含まれる微粉がコーティング面上に現れることで摺動面のなじみが良くなり、凝着が抑止される結果、耐摩耗性が向上すると思われる。なお、高温域においては、溶接、MSCoatingともに耐摩耗性が良好になるが、これは表面酸化により凝着が抑えられることによると考えられる。

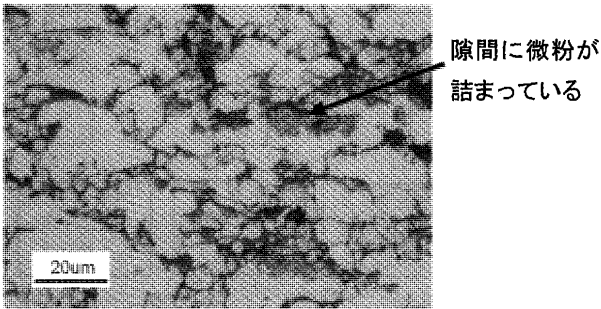


図15 耐摩耗性良好なMSCoating組織

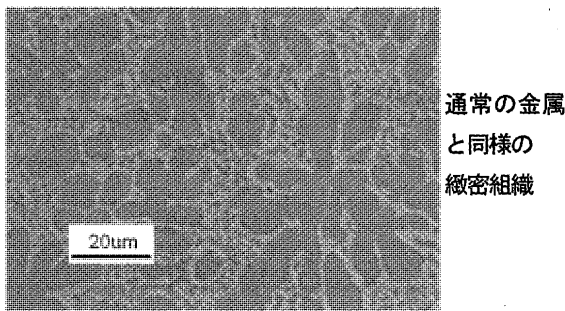


図16 Co基合金溶接の組織

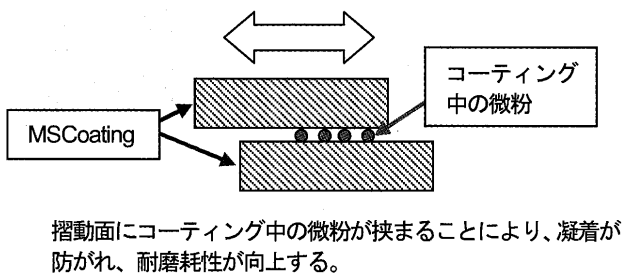


図17 MSCoatingにおける耐摩耗性向上のモデル図

#### 4. 実部品への適用例

前章までに示したように、MSCoatingは、母材への影響がほとんどなく、局所的な箇所に容易に施工でき、耐摩耗性も従来技術と比べ良好であることから、摩耗部位への補修、あるいは新製部品への耐摩耗用コーティングとして、実部品への適用が始まりつつある。本章ではその一例を紹介する。

(1) 燃焼器ライナーへの適用 エンジン転用ガスタービン部品に対する適用であるが、運転中の摩耗によって減肉した部位に対し、MSCoatingによる肉盛補修を行った。減肉部分は薄肉のため肉盛溶接による補修ができないことから、これまでは減肉により寸法が許容範囲から外れた段階で廃却処分となっていたが、MSCoatingを適用することにより補修が可能になった。また、MSCoating補修の後は、耐摩耗性が向上した結果、これまで生じていた摩耗による減肉も抑制された(図18参照)。

(2) 燃料ノズルへの適用 (1)同様、エンジン転用ガスタービン部品への適用例である。運転中に嵌め合い部が著しく磨耗するが、補修が難しいことから、廃却品が多数出していた。これもMSCoatingにより補修が可能となった。また、燃焼器ライナー同様、MSCoating適用後は運転中の摩耗が抑制された(図19参照)。

(3) 低圧タービンノズルへの適用 エンジンテストに供試されたジェットエンジンの低圧タービンノズルの位置決め溝が摩耗したため、MSCoatingにより補修を行った(図20参照)。このような狭い溝であってもC/Bを被処理面に接近させることができれば、施工は可能となる。

(4) 低圧タービンプレードへの適用 現在、ジェットエンジンの低圧タービンプレードにおいては、チップシュラウドのインターロック部分に、耐摩耗用としてCo基合金が肉盛溶接されている。それに代わる耐摩耗

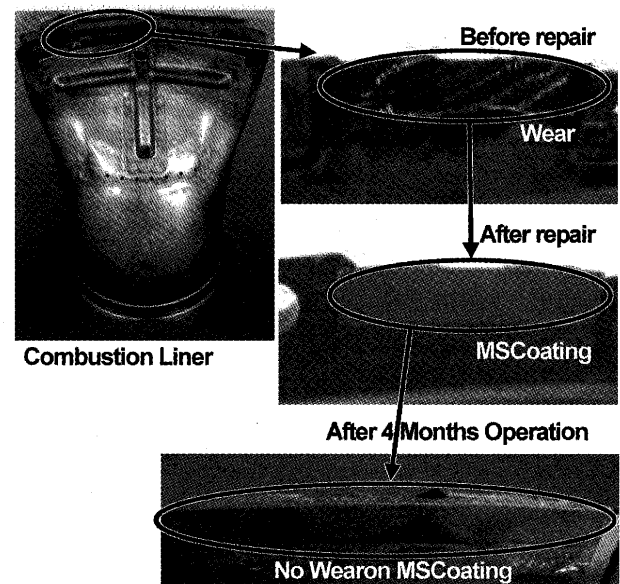


図18 燃焼器ライナー摩耗部の補修例

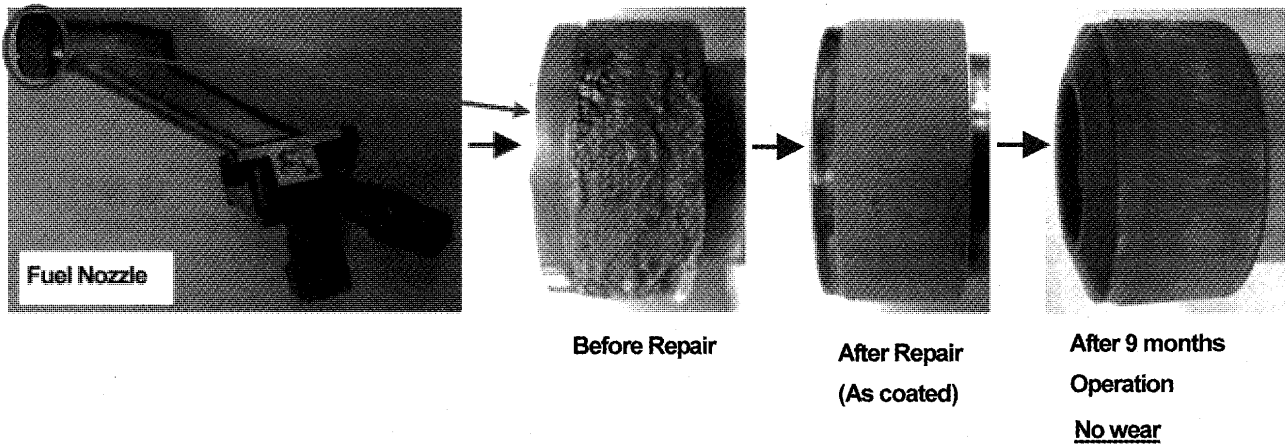


図19 燃料ノズル摩耗部の補修例

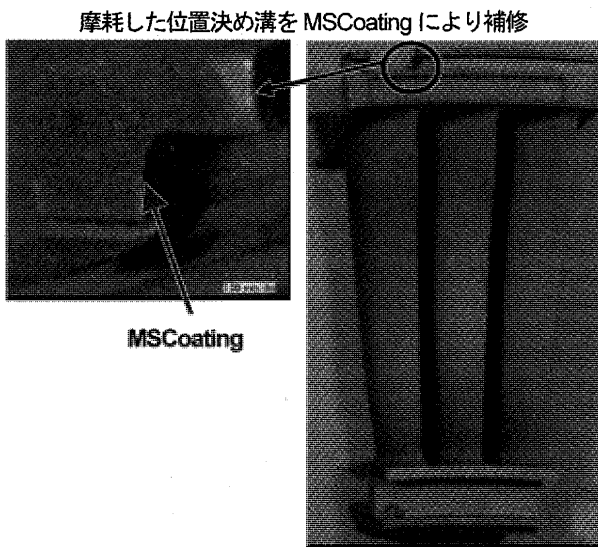


図20 低圧タービンノズル摩耗部の補修例

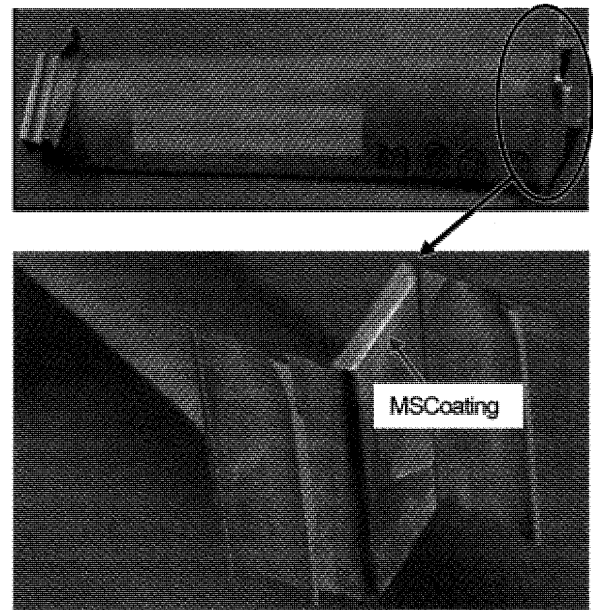


図21 低圧タービンブレードインターロックへの加工例

用コーティングとしてMSCoatingを適用すべく、現在開発を進めている（図21参照）。

5. おわりに

MSCoatingは、その加工性とコーティング性能から、摩耗部位に対しての補修や、耐摩耗性を必要とする箇所へのコーティングとして、局所的に施工するにはきわめて有効な技術である。さらに、MSCoatingの持つ革新性、汎用性を考えると、適用部位が広がることにより、表面処理の新たな分野となる可能性も秘めている。

また、航空宇宙分野においては、これまで欧米からの技術導入によるところが大きかったが、このMSCoatingは、日本から世界に向けた技術発信の格好の機会ともいえる。

産声を上げたばかりのMSCoatingは大きな可能性を持った技術である。その可能性を現実のものとするためには、更に開発を進めることにより適用範囲を広げていき、より多くの分野においてMSCoatingを利用したい、と思わせるような技術として育成してゆきたい。

謝 辞

本技術の開発と適用は、三菱電機株式会社の後藤氏をはじめ、多数の関係者からの支援のお陰である。ここに記し、深く感謝いたします。

参考文献

- (1) G. W. Meetham, The Development of Gas Turbine Materials, (1981), p. 259, APPLIED SCIENCE PUNLISHERS
- (2) R. Schafrik, R. Sprague, ADOVANCED MATERIALS & PROCESSES/MAY 2004 (2004), p. 29
- (3) 毛利尚武, 齋藤長男, 恒川好樹, 初山英教, 宮川昭彦, 精密工学会誌, Vol.59 (1993), p.625
- (4) 後藤昭弘, 眞柄卓司, 三宅英孝, 今井祥人, 齋藤長男, 毛利尚武, 電気加工学会誌 Vol.31 (1998), p.26
- (5) 大井成人, 佐藤亮一, 日本ガスタービン学会誌, Vol.33 (2005), p.25
- (6) P. Blau, ASM HANDBOOK. Vol.18 (1992), p. 590, ASM international

特集：トライボロジー

## 軸受技術概説

吉本 成香\*<sup>1</sup>

YOSHIMOTO Shigeka

キーワード：ころがり軸受，流体潤滑軸受，磁気軸受

## 1. 軸受の歴史

軸受とは、「一般に、軸を支え、これに回転運動あるいは直線運動を許す機械要素」と定義できる。軸受の歴史は古く、最も古い資料としては、紀元前2400年頃に描かれたティの像の運搬図<sup>(1)</sup>の壁画があり、エジプトのサッカーラで発見されている。この壁画には、水と思われる潤滑剤を、像を運搬するそりの下に注ぎ、摩擦の低減を図っている絵が描かれている。また、ころなどを重い運搬物の下に入れ運びやすくしているレリーフが紀元前700年頃に描かれている<sup>(2)</sup>。このように、人類は潤滑剤の滑り摩擦やころの転がり摩擦を利用するによって、摩擦を低減できることをかなり古い時代から感覚的に知っており、その効果を用いて多くの重量物を移動してきた。しかし、このようなすべり摩擦や転がり摩擦が工学的な技術として広く利用されるようになったのは、1700年代あるいは1800年代になってからである。

転がり軸受の原型は、1490年代から1500年代にかけてレオナルド・ダ・ビンチによって発想された<sup>(3)</sup>。その後、1700年代後半に馬車の車輪用軸受として使用され始め、さらに車両産業、産業機械へと適用が広がっていった。すべり軸受は、1600年代から水車用軸受などに利用され始めたが、潤滑油を用いた流体潤滑軸受として使われ始めたのは、1800年代後半になってからである。1883年には、B. Towerによって、油で潤滑されたジャーナル軸受内に圧力が発生することが実験的に確かめられ、その3年後の1886年に、現在の流体潤滑理論の基礎となる方程式（レイノルズ方程式）が、O. Reynoldsによって提案された。流体潤滑軸受では、気体を潤滑剤として用いることも可能であるが、これに関しては、1897年にA. Kingsburyが空気潤滑ジャーナル軸受の実験をはじめて行っており、当時の注目を集めた。この流体潤滑理論は、その後、弾性方程式と組み合わせられることにより、1960年代以降に弾性流体潤滑理論として構築され、転がり軸受の転動体や歯車の潤滑、さらには磁気記録テープやフォイル軸受などの特性予測に有効に使われるように

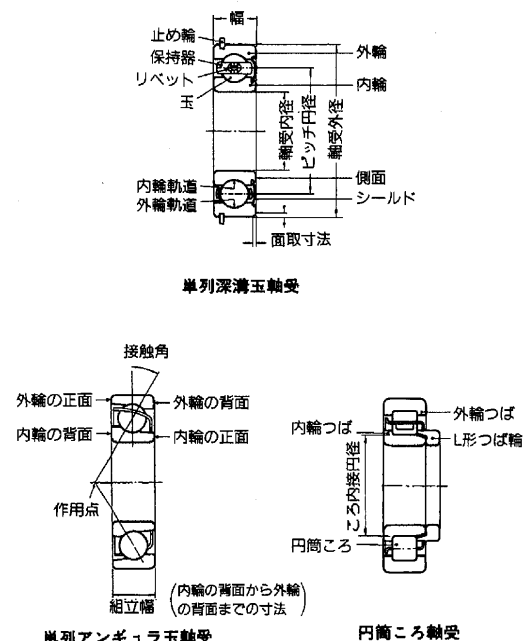
なっている。これらの軸受に対し、磁気軸受の歴史はきわめて浅く、能動制御型の磁気軸受は、第二次世界大戦中にJ. Beamsによって特許が取得されている。また実際に磁気軸受が市販されたのは、1976年になってからであり、フランス企業のS2Mより販売された。

以上、軸受の歴史を簡単に述べてきたが、現在、軸受は、種々の産業機械、輸送機械などに幅広く使用されており、「産業の米」とも言われるように、機械には必要不可欠な機械要素として認識されている。本解説では、このような軸受のうち、ターボ機械用として使用される軸受について、基本的な事項を含め最近の応用技術について述べることにする。

## 2. 転がり軸受

## 2.1 転がり軸受についての基本的事項

図1に、転がり軸受の代表的な種類と構造を示す。転がり軸受は、内輪、外輪、保持器、転動体で構成されており、転動体の形状（球あるいはころ）によって玉軸受ところ軸受に分けることができる。また転動体が球の場合

図1 転がり軸受の代表的な種類と構造<sup>(2)</sup>

原稿受付 2007年8月5日

\*1 東京理科大学 工学部 機械工学科

〒102-0073 千代田区九段北1-14-6



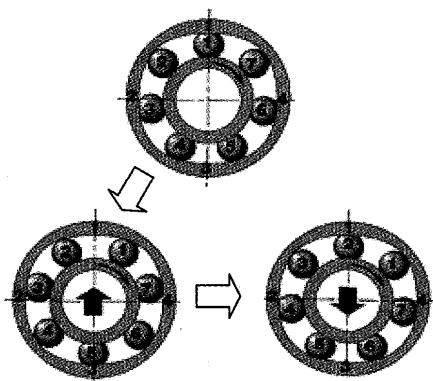


図2 回転による軸心位置の変化 (転動体通過振動)<sup>(3)</sup>

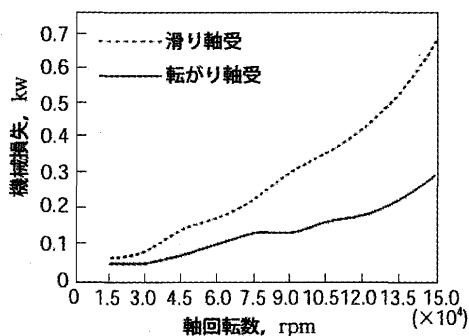
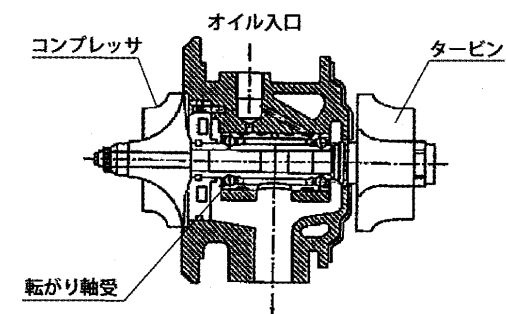


図4 セラミックス転動体を用いた転がり軸受のターボチャージャへの適用<sup>(4)</sup>

合、内外輪と球の接触角が0°の深溝玉軸受と接触角(15° 25° 30° 40°の4種類)を持つアンギュラ玉軸受がある。アンギュラ玉軸受では、内輪あるいは外輪に軸方向力を与えることにより予圧を加える(転動体にあらかじめ力を加え変形させておく)ことができ、これにより軸受振動の抑制、軸受剛性の向上を図ることができる。したがって小さい接触角を持つアンギュラ玉軸受は、高速回転用軸受として使用されることが多い。ころ軸受は、転がり軸受に比べ、より大きな荷重を受けられるため、航空機エンジン用軸受などに使用されている。

次に、ターボ機械では軸の振動が問題となることが多いが、転がり軸受によって支持された回転軸の軸心は、種々の要因によって移動し、振動を生ずる原因となる場

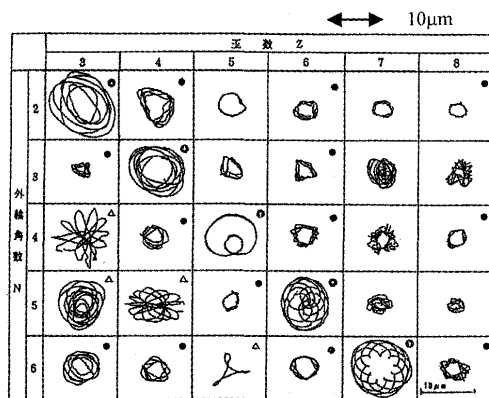


図3 外輪の真円度誤差に起因した軸心の移動 (深溝玉軸受:6206, 15rpm, 外輪真円度8μm, ジグを用いて外輪に正多角形の弾性変形を与えて測定)<sup>(4)</sup>

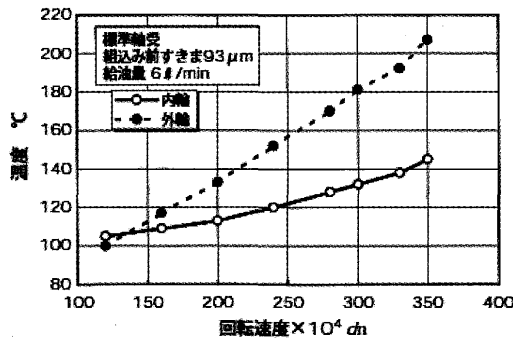
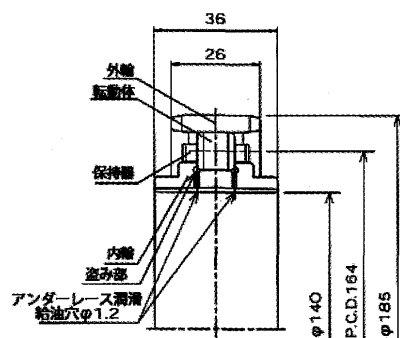


図5 ころ軸受のアンダーレース潤滑<sup>(4)</sup>

合がある。図2には、転がり軸受が回転した場合の軸心位置の移動状態を示す。転がり軸受は、内外輪の間に転動体を挟み込み、軸回転に応じて転動体を回転させることによりスムーズな軸回転を得る原理となっている。したがって図に示すように、軸の直下に転動体がある場合には、軸は上方に移動し、転動体がない場合には、下方に移動することになる。このように転がり軸受によって支持された軸の軸心は、その原理上から、軸回転とともに常に移動することになり、転動体通過振動と呼ばれる。また軸心の移動は、転動体や内外輪の形状精度の不完全性によっても生じる。図3に、外輪に正多角形の弾性変形を与えた場合の転動体数による軸心移動の軌跡を測定した実験結果<sup>(3)</sup>を示す。正多角形の面数(縦軸)をnとすると転動体の数(横軸)がn+1のときに軸心の描く軌跡の半径が、特に大きくなっていることが分かる。

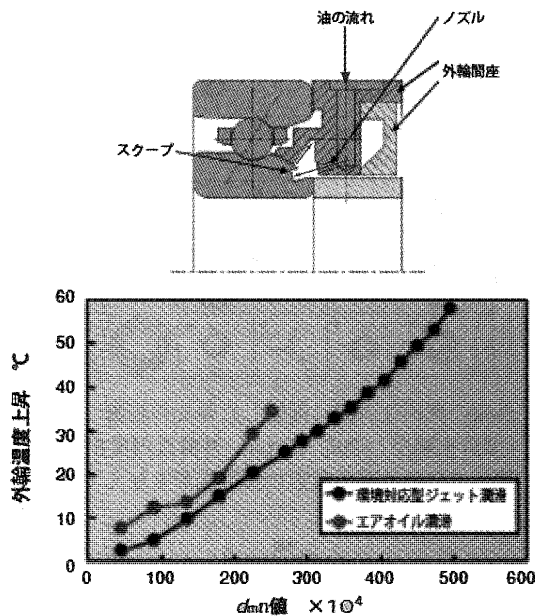


図6 転がり玉軸受のジェット潤滑<sup>(8)</sup>

このほか、外輪の固有振動によっても軸心移動が影響を受けることが知られている<sup>(5)</sup>。

## 2.2 転がり軸受の高速回転化

転がり軸受の高速化を行うためには、転がり軸受に使用する材料および潤滑に関する問題を解決する必要がある。

図4は、転がり軸受の構成材料を改善することによりターボチャージャへの適用を可能にした例<sup>(9)</sup>である。保持器に、耐熱性、耐摩耗性に優れた熱可塑性のポリイミドを用い、さらに転動体に密度が小さく耐熱性のあるセラミックスを、内外輪材料に高温用鋼 (SHX材) を用いたものである。図に示されるように、従来のすべり軸受タイプに比べ、15万rpmで軸受消費動力 (機械損失) を50%程度低減できることが分かる。

図5、図6に、転がり軸受の潤滑方法を改善することにより、より高速な回転を可能とした例を示す。転がり軸受では、軌道輪と転道体間に油膜を形成することにより、それらの直接の固体接触を防ぎ、摩耗や焼き付きを防いでいる。したがって高速回転用の軸受では、この接触面に有効に油を注入することが重要な潤滑技術となる。そのための潤滑方法として、図5に、ころ軸受におけるアンダーレース潤滑法を示した。この方法では、接触面近くの軌道輪に、直接、穴を空けることで給油口を設け、軸回転による遠心力を利用して接触面に潤滑油を供給する構造となっている。これにより、DN (=軸直径 [mm] × 回転数 [rpm]) 350万を達成している。

図6には、転がり玉軸受におけるジェット潤滑法を示す。この潤滑法では、加圧された潤滑油を、ノズルを通して強制的に軸受に供給しており、高い冷却効率と潤滑性能を得ることができる。この例では、DN値500万を達成している。

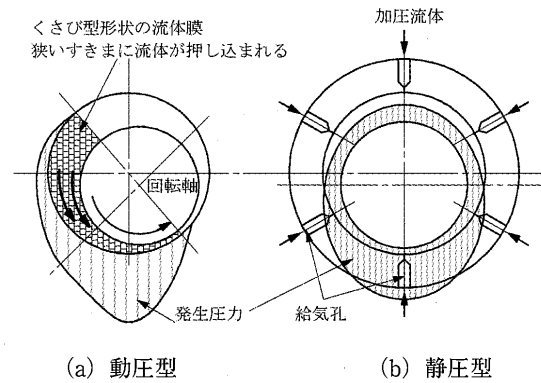


図7 流体潤滑軸受の種類

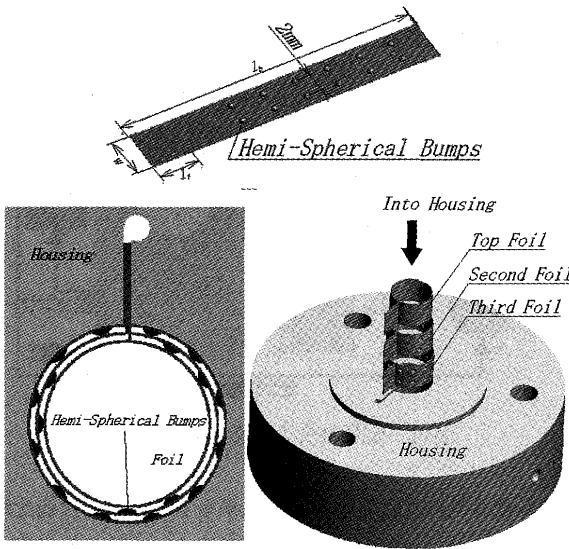
## 3. 流体潤滑軸受

### 3.1 流体潤滑軸受についての基本的事項

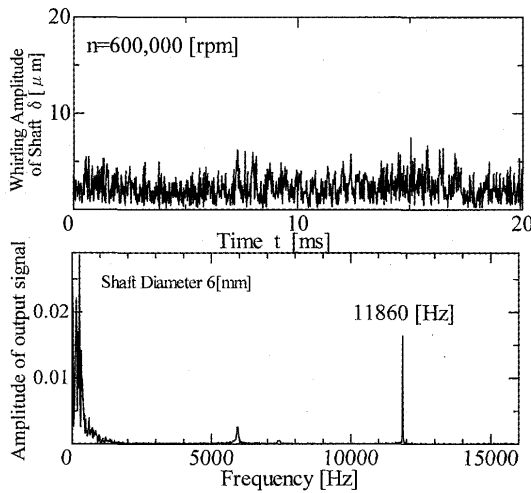
流体潤滑軸受の場合、固体接触部分がないため、軸受の摩耗をきわめて小さな値に留めることができる。よってターボ機械用としては大型発電機用軸受など、大きな軸荷重を長時間にわたって安定的に支持する必要がある箇所に数多く使用されてきた。また比較的高温の環境下で高速回転を必要とするターボチャージャにも使用されており、ディーゼルエンジンには欠くことのできない要素技術となっている。このような流体潤滑軸受は、図7に示すように、おもに動圧型と静圧型とに分けることができる。動圧型では、軸が偏心する (荷重により軸中心と軸受中心が一致しなくなる) ことにより軸と軸受間のすきまにくさび状の流体膜が形成され、軸回転により、流体がくさび膜の狭くなるすきまにむりやり押し込まれることによって圧力が発生する。動圧型では、この流体膜内に発生する圧力を用いて、負荷荷重を支えることになる。一方、静圧型では、軸受に小径の流体供給口 (給油孔あるいは給気孔と呼ばれ、流体抵抗により流量を絞る作用を持つ) が設けられており、それを通して加圧流体が軸受すきま内に送り込まれる構造となっている。静圧型では、軸が偏心することにより、供給口の持つ流体抵抗の作用により、すきまが広がった領域にある供給口出口圧が低下する一方、すきまが小さくなった領域にある供給口出口圧は増加する。この供給口出口圧の差によって負荷荷重を支える力を生成することになる。

### 3.2 流体潤滑軸受の高温対応および高速回転化

流体潤滑軸受を高速で回転させる場合、Half-frequency Whirlと呼ばれる不安定振動が発生する。この振動が発生した場合、軸の回転振れが著しく大きくなり、軸と軸受が接触し焼き付きを生じる原因となる。したがって流体潤滑軸受を高速で使用する場合には、この不安定現象の発生限界回転数をいかに高めるかが重要となる。さらに近年、ターボチャージャやガスタービンなどにおいては、より効率を高めるために、さらなる高速化、高温化が求められており、それに伴い、オイルフリー空気軸受が注目を集めるようになってきている。ここでは、おもに高速回転を可能とした小型の回転スピンドル用空気軸



(a) 半球突起を持つ三層フォイル軸受の構造

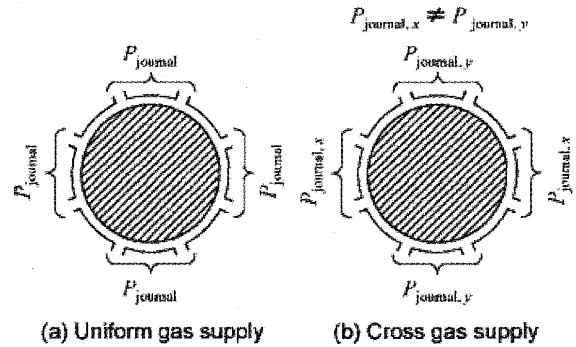
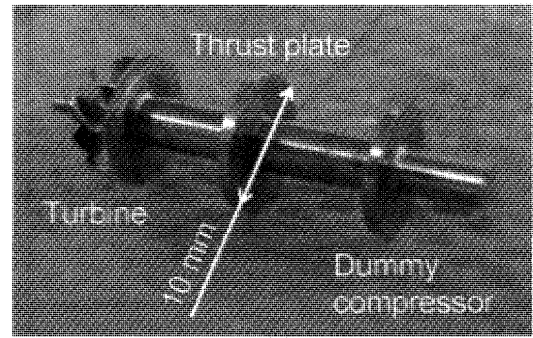


(b) 高速回転時における軸振れ量と回転周波数

図8 動圧型空気フォイル軸受の構造とそれによって支持された回転軸の回転時特性<sup>9)</sup>

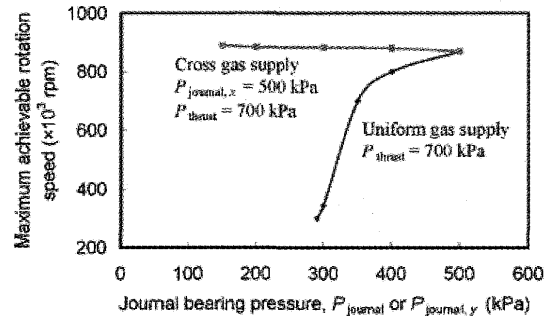
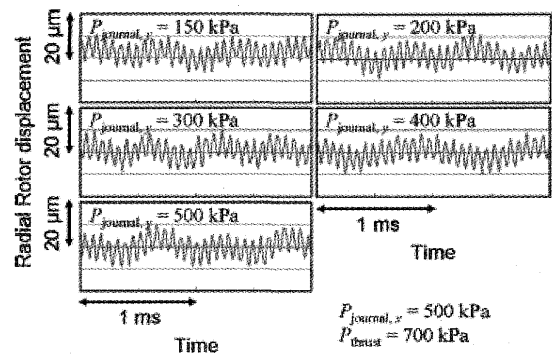
受の最近の研究例について述べる。

図8(a), (b)には、半球状の突起を持つ動圧型の空気フォイル軸受の構造とその軸受によって支持された回転軸の高速回転時における特性を示す。フォイル軸受は、三層のフォイルからなっており、二層目、三層目のフォイルには、軸方向に2箇所、円周方向には不等間隔に数カ所の半球状の突起が設けられている。フォイルの幅は5mm、厚さは0.1mmであり、ステンレス鋼を用いている。これにより、トップフォイルを弾性的に支持している。図から分かるように、回転軸(直径6mm、質量4.7g、軸長さ23mm)は、5μm以下の振れまわりで約71万rpmの回転速度で安定に回転していることがわかる。フォイル軸受によって、このような小さな軸を支持し、高速に回転させた報告としては文献(10)があるが、この場合においても、軸径6mmで70.2万rpmを達成している。



(a) Uniform gas supply (b) Cross gas supply

(a) 軸および軸受の形状



(b) 回転時の軸振れ量と給気圧差が安定限界に与える影響<sup>10)</sup>

図9 静圧空気軸受を用いた超高速回転軸の構造と回転時特性

図9(a), (b)には、静圧型の空気軸受を用いて直径10mmの回転軸とそれを支持する軸受構造および回転軸の回転時特性を示した。二種類の静圧空気軸受に対して、高速回転時における安定性の実験が行われている。図に示すように、一つは従来の静圧軸受と同様であり、円周8箇所の給気孔から、同一の給気圧で加圧空気が軸受すきま内に供給されている。他のものは、異なる給気圧を

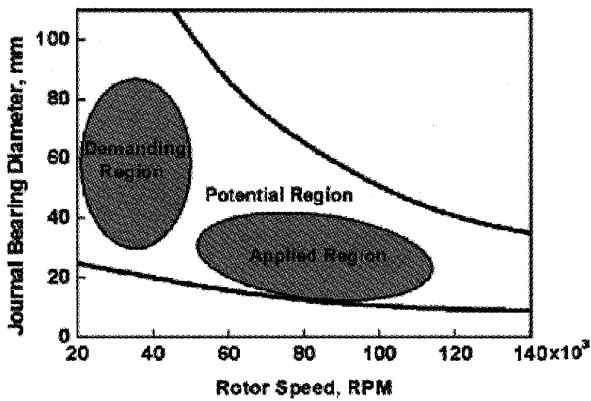


図10 近年のターボプロアに対する要求仕様性<sup>13)</sup>

給気孔に与えている。図9(b)に示されるように、給気孔の給気圧力を変化させることにより、低い給気圧力の領域においても、約90万rpmに到達する安定した高速回転が得られることが分かる。静圧空気軸受では、給気孔から流入する空気の流速が早くなった場合、軸受すきま内を流れる空気の慣性力により空気膜の減衰性が増し、高速安定性が大きく改善されることが知られている<sup>12)</sup>。この種の軸受では、この空気の慣性力の効果を有効に利用することにより、きわめて安定な高速回転を実現している。

なお、ここでは、小径の高速回転軸について説明を行ったが、図10に示すようなターボプロア用軸受に対する要求仕様では、軸径は40mmから80mmと大きいものとなっており、このような要求に対するフォイル軸受の実用研究も精力的に進められている<sup>13)</sup>。

## 4. 磁気軸受

### 4.1 磁気軸受の基本的事項

図11に、磁気軸受の動作原理図を示す。磁気軸受は、コイルが巻かれた電磁石、非接触変位センサ、および信号処理を行う制御系で構成されている。図に示すように、非接触変位計によって検出された軸位置は、変位計から出力電圧としてPCなどの信号処理器に入力される。信号処理器では設定値との差分が演算された後、その電圧がパワーアンプに入力される。パワーアンプでは入力電圧に比例した電流が生成され、磁気軸受の電磁石コイルに入力される。これにより必要な電磁石の吸引力が軸に与えられ、その位置が制御されることになる。

表1には、転がり軸受およびフォイル空気軸受、磁気軸受において、DN値を200万程度とした場合における各種性能を、これまでに報告された実験をもとにまとめたものを示す。表から分かるように、転がり軸受においては、潤滑油を使用することから使用可能温度が、多少低くなっている。これに対し、フォイル空気軸受および磁気軸受では、500℃を超える温度で実験が行われ、その環境下で使用可能であることが確認されている。単位面積あたりの負荷容量は、転がり軸受が最も大きく、フォ

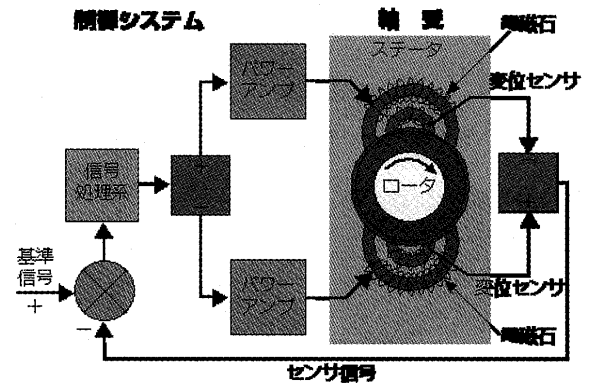


図11 磁気軸受の構造と制御系<sup>14)</sup>

表1 各種軸受形式に対する実験結果をもとにした性能比較<sup>15)</sup>

	転がり軸受	フォイル空気軸受	磁気軸受
最高使用可能温度	180~260℃	650℃	540℃
DN 値	2,000,000	2,000,000 (50mm 直径の軸) 理論的には、未知	2,250,000 (75mm 直径の軸) 理論的には、未知
単位面積あたりの負荷容量	300 psi	100 psi	116 psi
消費動力	6~8kW (12krpm) 7.11 kW (17krpm)	No data	2.1 kW, 540℃ すべての回転数において

イル軸受と磁気軸受は、100psi程度の値となっている。なお、フォイル軸受の消費動力の実験的なデータは示されていない。

フォイル軸受と磁気軸受は、ともに、高温で使用可能であり、また接触部を持たないため、今後、ガスタービン用軸受として使われていく可能性が高いと思われる。この二種類の軸受の使い分けとしては、比較的大きな荷重が必要であるが低速回転でよい大型の機器には磁気軸受が使用され、小さな荷重であるが高速回転が必要な小型の機器にはフォイル軸受が使用され、それぞれの特長が生かされていくものを思われる。

### 4.2 磁気軸受の最近の研究事例

図12には、NASAで行われている高温環境下での磁気軸受の特性を得るための実験装置を示す。磁気軸受ロータの外径は75mm、ステータ外径は200mm、その間のギャップは0.56mmに設定されている。図13に、吸引しうる最大荷重と電流値を示す。実験においては、温度を27℃から538℃まで変化させ、軸回転数は、0 rpm, 15,000rpmとしている。温度が上昇することによって吸引力は低下するものの、15Aの電流値で1 kNの荷重を

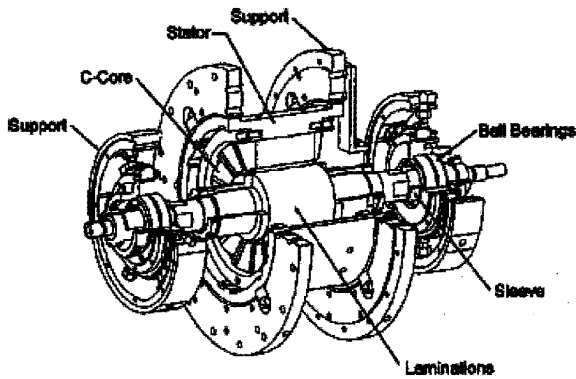


図12 磁気軸受の高温下環境下用実験装置

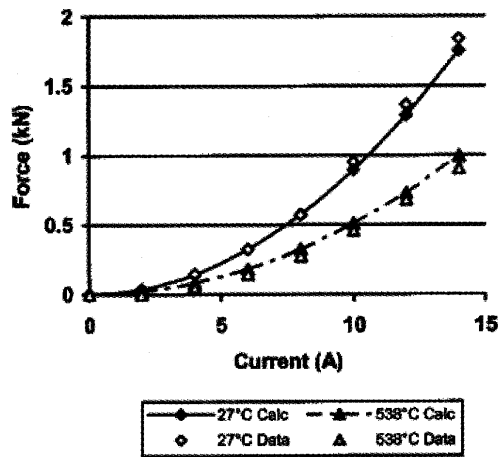


図13 最大吸引力と電流値の関係 (温度の影響)

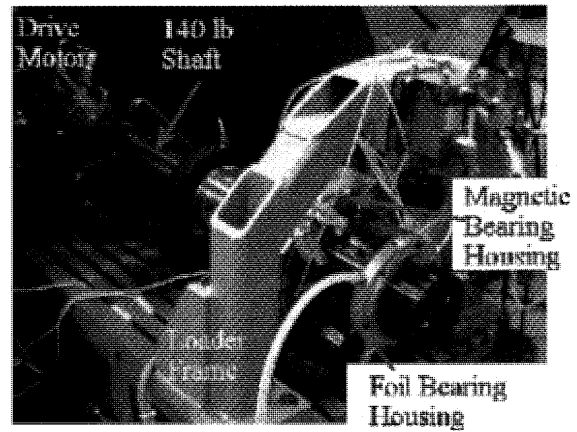


図14 ハイブリッド型磁気/フォイル軸受用実験装置

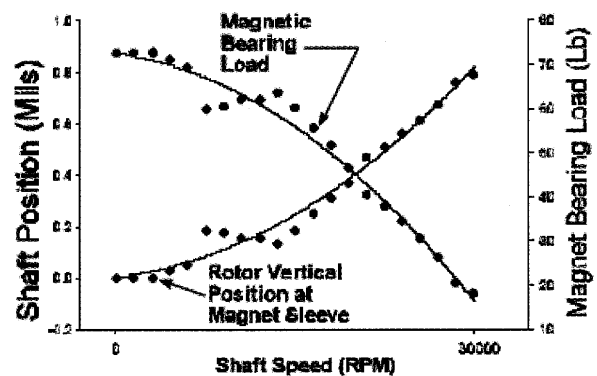


図15 軸回転速度と軸位置および磁気軸受の負荷荷重分担の関係

吸引できることが分かる。

図14は、ハイブリッドタイプ型磁気/フォイル軸受の構造を示す。フォイル軸受では、軸の回転開始および停止時に固体接触を避けることはできない。現在、10万回を超すスタートストップ試験に耐えられるコーティング材が開発されているが、摩耗を完全に防ぐことができるわけではない。このハイブリッド型の軸受は、フォイル軸受のこのような欠点を磁気軸受によって補うことを目的として開発された。図15に、軸回転速度と磁気軸受が受け持つ負荷荷重の関係を示す。低速回転では、磁気軸受が負荷荷重の大半を受け持っているのに対し、30,000rpmでは、磁気軸受の分担荷重がかなり小さくなっていることが分かる。

### 5. まとめ

ガスタービンなどのターボ機械に使用されている軸受の種類と特性について、基本的事項を含めて最近の研究および応用事例について述べた。必ずしもガスタービンに詳しくない筆者が書いたものであるが、多少、的はずれな点があるとは思いますが、本稿が読者にとって何らかの参考になれば幸いです。

### 参考文献

- (1) D. ダウンソン, トライボロジーの歴史, (1997), p.27, 工業調査会
- (2) NSK転がり軸受総合カタログ (CAT. No.1101c)
- (3) 野口昭治, 小野京右, 日本機械学会論文集C編, 64-620, (1998-4), p.1398
- (4) 岡本純三, 大森達夫, 平田正幸, 日本トライボロジー会議予稿集, 北九州, (1996) p.427
- (5) 太田浩之, 佐竹伸也, 日本機械学会論文集C編, 66-641, (2000), p.267
- (6) NSK Technical Journal, 672 (2001), p.79
- (7) 藤井健次, NTN Technical Review, 67 (1998), p.53
- (8) 赤松良信, 森正継, NTN Technical Review, 72 (2004), p.6
- (9) M. Salehi and H. Heshmat et al., Trans ASME, J. of Eng. for GT and Power, 129-1, (2007), p. 171
- (10) 升永傑, 吉本成香, 日本機械学会200年度年次大会講演論文集, Vol.4 (2005) p.281
- (11) S. Tanaka, M. Eshashi, K. Isomura et al., Trans ASME J. of Trib. 129-3 (2007) p.655
- (12) A.Mori, K.Aoyama and H.Mori, Bull. of JSME, 23-178, (1980), p.582
- (13) K. Kim, and I. Lee, Trans AMSE, J of Trib., (2007) p.843
- (14) 例えば, <http://www.s2m.co.jp/technology.html>
- (15) D. Clark, M. Jansen and G. Montague, NASA/TM-2004-21377 (2004)
- (16) Provenza et al., Trans ASME, J. of Eng. for GT and Power, 127-2, (2005), p. 437
- (17) MiTi Development, Vol.2, (1998)

特集：トライボロジー

## マイクロガスタービンにおける空気軸受実用例 (その構造と実績および耐久性について)

柴田 聡\*1  
SHIBATA Satoshi

キーワード：マイクロガスタービン，コージェネレーション，空気軸受，可撓薄板，弾性板，ラジアル空気軸受，スラスト空気軸受

### 1. はじめに

地球温暖化防止の一方策として業務用小型分散型発電と熱エネルギー供給の機器として2000年より日本で販売されたタクマ・マイクロガスタービン・コージェネレーション・パッケージ (TCP30)<sup>1)</sup>に搭載されたのが米国Capstone社製28kWマイクロガスタービンである。

本報では、マイクロガスタービンの概要とTCP30の構成とその特徴を説明し、その要素技術のひとつである空気軸受の構造と原理をCapstone社のマイクロガスタービンを例にとりて説明する。あわせて、当社における空気軸受の現在までの運転実績と耐久性について報告する。

### 2. TCP30(タクマ・コージェネレーション・パッケージ)

#### 2.1 マイクロガスタービンの概要

Capstone 28kWマイクロガスタービンは、もともと軍用航空機の補助発電機に利用されていた技術を応用し開発され、産業用ガスタービンとは異なり、エンジンは人間が抱えることができるほど軽量かつコンパクトなものである。また、マイクロガスタービンでは、空気軸受の採用により、メンテナンス頻度の低減が図られ、超高速発電機を備えた再生サイクルエンジンのため、小容量ながらも大型タービン並みの発電効率を得ることができ、希薄燃焼方式によって燃焼温度が低く抑えられるためレシプロエンジンに比べて低NO<sub>x</sub>化を実現している。

Capstone 28kWマイクロガスタービンは、都市ガス、LPG等の気体燃料ならびに灯油、軽油の液体燃料を使用することができる。使用燃料によって構成機器は若干異なるが、構成要素としては、図1に示すように、タービン発電機本体 (Turbo Generator)、電力制御装置 (Digital Power Controller : DPC)、燃料供給装置 (Fuel System) に大きく分けることができ、シンプルかつメンテナンス性が良好である。また、タービン発電機の内部構造を図2に示す。本マイクロガスタービンは、エンジン本体と

発電機は一体構造となっており、一軸直結単段再生式のガスタービンである。燃焼室 (Combustion Chamber) は、タービン (Turbine) 出口煙道の外側に筒状に配置され、再生器 (Recuperator) は、燃焼室の外周に同じく筒状に配置された同軸構造となっており、エンジンは非常にコンパクトになっている。

動作としては、エアフィルタを通った燃焼用空気は、発電機 (Generator) を冷却した後圧縮器 (Compressor) に導入される。その後、再生器にて排ガスと熱交換を行い燃焼

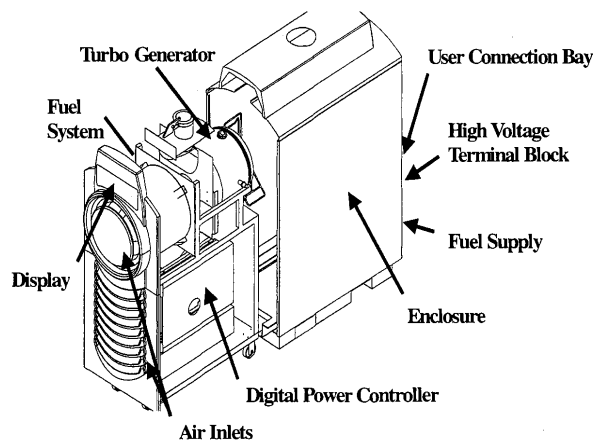


図1 キャプストンマイクロガスタービン外観

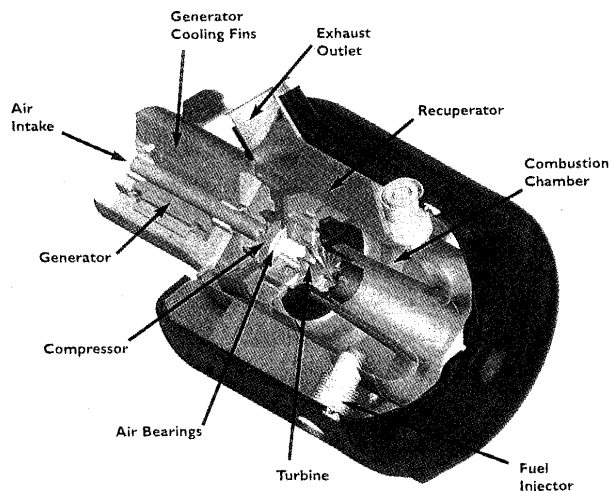


図2 マイクロガスタービン内部構造

原稿受付 2007年7月9日

\*1 株式会社タクマ

新環境事業本部新環境メンテナンス部本社メンテナンス課  
〒660-0806 尼崎市金楽寺町2丁目2-33

室へ導かれ、燃焼室に設置された3本の燃料ノズル (Fuel Injector) から供給されるガスが希薄燃焼を行い800℃程度の高圧燃焼ガスを生成する。この燃焼ガスは、タービン (Turbine) において膨張し、発電機を96,000rpm

で回転させ、1,600Hzの交流を発生させる。タービン排ガスは、約600℃で排出されるが、再生器において燃焼用空気と熱交換を行い約300℃で排ガス出口 (Exhaust Outlet) から排出される。発電機によって発生した1,600Hzの交流は、DPC内のコンバータで一旦直流に変換され、インバータで商用周波数に変換され出力される。

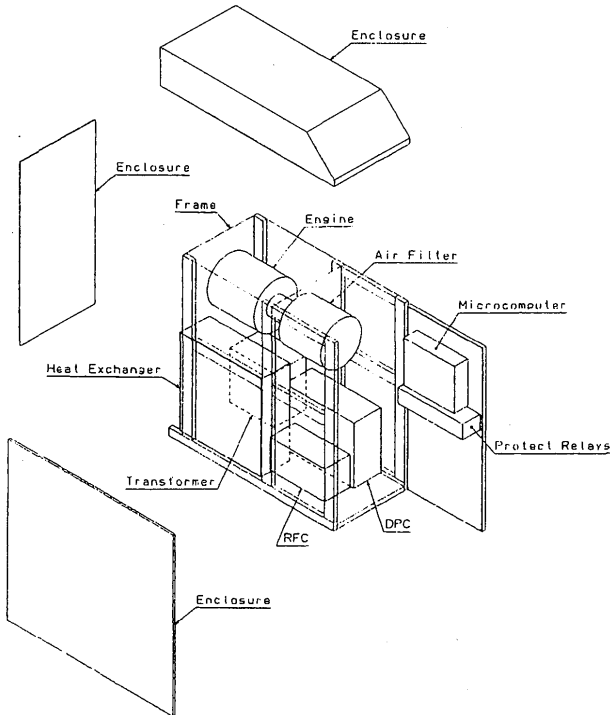


図3 TCP30構成要素

2.2 TCP-30温水回収システムの概要

TCP-30温水回収システムの構成要素を図3に、温水回収システムフローを図4に示す。図3、図4のようにCapstoneマイクロガスタービン本体、電力制御装置 (DPC)、燃料供給装置 (RFC)、排熱回収装置、変圧器、系統連系保護装置、TCP-30制御用コンピュータで構成され、防音対策を施したエンクロージャー内部に収められている。このTCP30の総合効率率は75%にも達する。

3. 空気軸受の構造

Capstone社製空気軸受は動圧気体軸受の一種であり、この空気軸受はラジアルベアリングもスラストベアリングも、可撓面軸受 (Compliant foil bearing) に分類される。<sup>(2)</sup> 図5に空気軸受周りの断面写真を示す。

3.1 ラジアルベアリング

ラジアルベアリングの構造を図6(a) に、図6(b) は

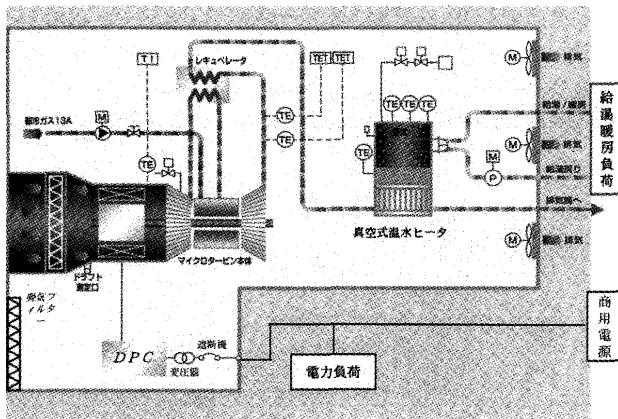


図4 温水回収システムフロー

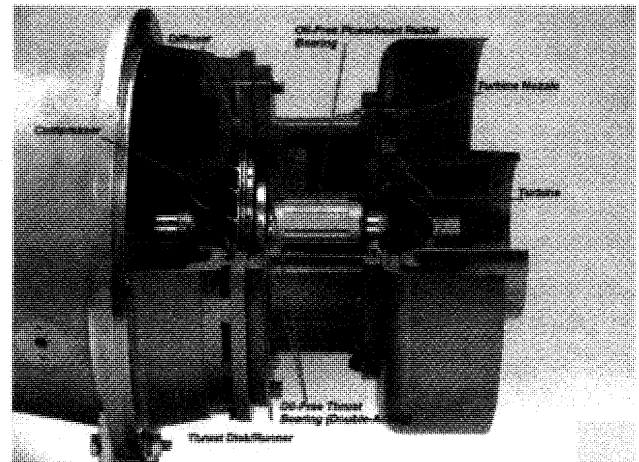


図5 空気軸受部断面写真

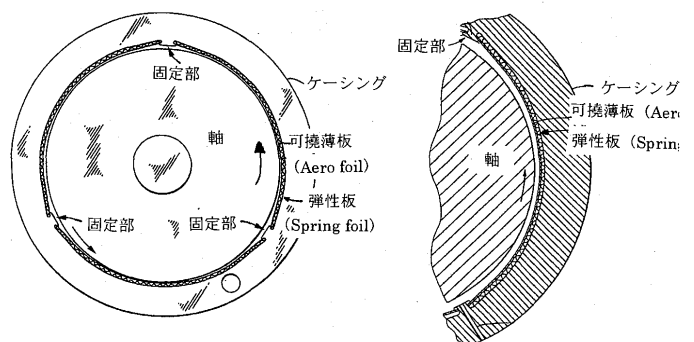
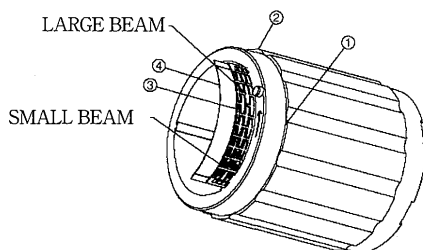


図6 (a)ラジアルベアリングの構造図 (b)ラジアルベアリング正面図 (c)ラジアルベアリング拡大図

ラジアルベアリングを正面から見た図を示す。さらに図6(c)には、図6(a)の正面拡大図を示す。軸に直接接触する可撓薄板 (Aero foil) ④と正確な傾き弾性度を持って仕上げられた弾性板③をその固定ケーシング①に差込み、保持することにより、高負荷特性を発揮し、高弾性、低運動トルク、低スタートトルク、低速立ち上がり/低速着地速度を実現し、軸振動は非常に小さく、低部品点数で、低製造コストを実現している。実際組み立ても非常に簡単である。可撓薄板 (Aero foil) ④と弾性板 (Spring foil) ③を2つ重ねてケーシング①の3分割された部分に挿入するだけである。このとき弾性板③の向きを間違わないように気をつける必要がある。実際は、誤挿入防止加工によって反対の向きには差し込めない構造をとって品質管理している。3つの分割した部分に各薄板 (Foil and spring) を入れて、運転中に前に飛び出さないように固定用のCリングを装着して完成である。

作動原理も簡単である。起動時軸の回転数をインバータにより25000rpmに瞬時 (1秒前後) に増速する。実際5000rpmで軸受軸と可撓薄板 (Aero foil) の間には、空気層が構成され非接触になる。このとき弾性板 (Spring foil) のスプリング強度が、軸回転方向に強くなっており、スプリング固定端に向かって楔形の空気層が形成されるようにスプリング強度がコントロールされている。図7に弾性板 (Spring foil) の形状を示す<sup>9)</sup>。このスプリングが三方より軸中心に向かうよう形成されることにより軸を安定的に固定できる。このようにして軸は軸中心に近いところで回転する。始動、停止は可撓薄板 (Aero foil) には必ず接触することになるから、その表面コーティングはダイヤモンドライクカーボン (DLC) のような低摺動部材でかつ耐熱性のある部材をコーティングしてある。これで耐久性は40000時間、2-3回/日のDSS (Daily start and stop) 運転では問題ないことを証明している。さらに毎回の起動停止時に可撓薄板 (Aero foil) と接触する部分は決まっており、その他の部分は、起動・停止および運転中には、非接触で運転されていることが、長期運転後の分解結果から判っている。

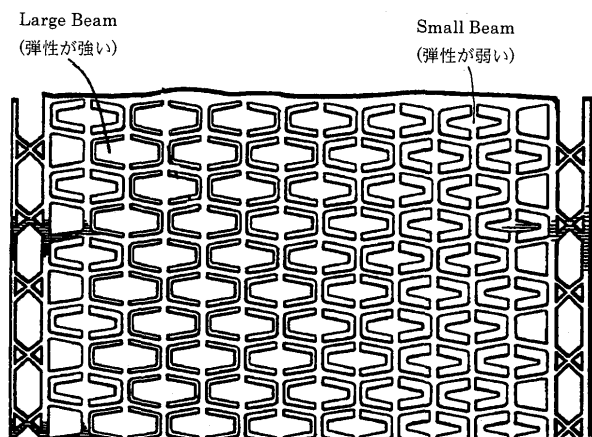


図7 弾性板の形状

### 3.2 スラストベアリング

図8にスラストベアリングの構造図を示し、図9に代表的な形状図を示す<sup>9)</sup>。ラジアルベアリングと異なり、非接触である。ステンレスの膜厚20 $\mu$ の円盤が4種類の形状を変えて積層されている。それぞれスラストディスクの軸中心に向かってヘリボン形状に微小面積が縮小して、4枚積層することによって軸中心に向かって微小断面が減少変化するように構成してある。高速で回るスラストディスクに随伴する空気が、微小な空間を軸中心に向かって断面積が減少することによって空気抵抗が上昇し、スラストディスクと非接触を構成する。このスラストベアリングはスラストディスクの左右に設置され、スラストディスクとトップスラストフォイルとの隙間は10 $\mu$ 程度である。これにより起動、停止および燃焼状態の可変時の圧力変動、およびタービン外部の排気圧力 (背圧) の制御を行っている。また、この隙間のコントロールが発電効率に大きく寄与している。すなわちこのマイクロガスタービンのシュラウドと、ラジアルコンプレッサー、ラジアルタービンの隙間を小さくコントロールすることが、コンプレッサー効率、タービン効率を向上させ、ひいてはマイクロガスタービンの発電効率向上に貢献している。

### 3.3 空気軸受の特徴

空気軸受の特徴として1) 低振動、2) 外部潤滑装置、オイル、冷却水が不要、3) 無揺動、4) 低トルク、5) 磨耗がない、6) 軸受けスペースがコンパクトに設計できる、7) 低騒音、8) 低メンテナンスコスト (この空気軸受けはエンジン交換寿命まで交換しない)、9) 製造が簡便、10) 高効率 (軸受けロスがない: 非接触) 等

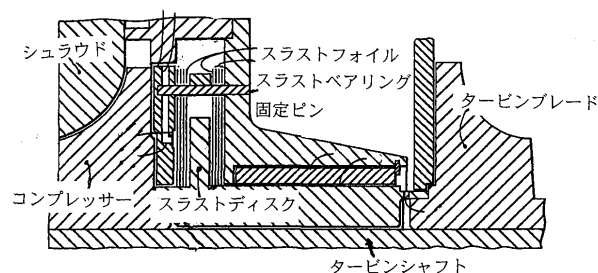


図8 スラストベアリングの取付断面図

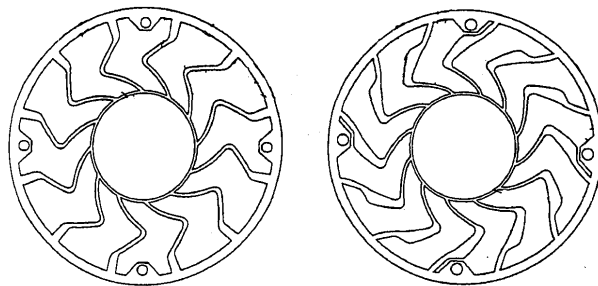


図9 スラストベアリング代表形状図



数々の利便性を備えている。

ただし、機構、構造は簡便であるが、設計はかなり難しく、気体軸受メーカーと共同で設計から取り組み、実験を経て最適形状を決める。通常の転がり軸受のように規格化されてはいない。あくまでも機器に合わせた最適設計が必要である。

## 4. 空気軸受の実績・耐久性

### 4.1 当社の状況

当社は2000年からこのコージェネパッケージを販売した。すでに連続運用（点検時に数回／年の停止）ながら運転時間40000時間を越える機器が出てきており、空気軸受の実績は着々と積上げられている。さらにDSSの機器では、運転時間30000時間を超え、スタート&ストップは7000回を数える機器が出てきている。

現在当社が管理しているTCP30, 60は約100台である。運転上の大きな問題はなく、この空気軸受を含めエンジン設計の寿命である40000時間を目指して日々運転を継続している。

### 4.2 Capstone機の状況

2007年3月までにCapstone社は全世界に30kW, 60kW機を合わせて、4000台のマイクロガスタービンを出荷している。現在60kW機も40000時間の耐久性を確立しつつある。また、200kW機にも同様の空気軸受を採用しテスト運転継続している。

### 4.3 高温用空気軸受の開発<sup>6)</sup>

Capstoneは現在米国NASA Glenn Research Centerと共同で現状300℃の空気軸受耐熱温度を500℃に上昇させ

る研究も行っており、より高効率のMicroTurbineの開発を目指している。

## 5. その他の応用事例

- 1) マイクロガスタービン用燃料コンプレッサー：Capstone28kW級に開発された遠心式の多段コンプレッサーであるが、常時回転数が45000rpmで運転するためこの空気軸受を採用している。
- 2) 空気コンプレッサー：実際に空気軸受のコンプレッサーが販売されている。
- 3) 航空機のACM (Air Cycle Machine) / APU (Auxiliary Power Unit) として数多く使用されている。機内空調 / 電源に使用されている。

## 6. おわりに

一部の機械には、1960年ころより使用されてきたこの空気軸受が、小型分散型発電機の構成部に使用され、十分機能を発揮することが実証された。また、潤滑油、冷却水を使用しない高速軸受を構成することができ、保守管理の面からもメンテナンスフリーの機器構成が可能になった。今後、小型の高速回転機器に応用されることを期待している。最後に、快く資料の提供をいただいた米国Capstone社に感謝の意を表します。

## 参考文献

- (1) 柴田聡 他, 日本ガスタービン学会誌, 31-5 (2003-9), p.311
- (2) 十合晋一, 気体軸受設計ガイドブック, (2002), p.7, 共立出版
- (3) Bosley, R. W., US Patent, (1995), 5, 427, 455
- (4) Bosley, R. W., et al, US Patent, (1999), 5, 827, 040
- (5) Lubell, D., DellaCorte, C., Proc. of GT2006-90572 (2006-5)

特集：トライボロジー

## メカニカルシール

秋山 浩二\*<sup>1</sup>  
AKIYAMA Koji

キーワード：メカニカルシール，遠心圧縮機，スクリュウ圧縮機，ドライガスシール

## 1. はじめに

今日，流体の流れを制限するために使われるシールは，各産業分野から，日常私たちが使用している家電製品，ガス水道といった生活基盤にまで至るところで使われており，その種類も多岐にわたる。この中でもメカニカルシールは，最も多く使われている回転機械用シールの一つである。メカニカルシールは，回転部品と固定部品を持ち相対的にしゅう動するシール面（2項参照）を持っており，その性能の善し悪しは，シール面の潤滑（漏れ）と接触（摩擦）の矛盾した両条件の最適点を，安定して維持することでありトライボロジーとは離れることができない。

ガスタービン関連においてもメカニカルシールは，ガスタービンに燃料となるガスを供給する燃料ガス圧縮機，及び天然ガスパイプライン等でガスタービンによって駆動される圧縮機に，その軸シールとして使用されている。また圧縮機のベアリングにオイルを供給するポンプにもメカニカルシールが使用されており，付随しているメカ

ニカルシールの性能はガスタービンを含めたシステムの安定運転に不可欠なものである。ここでは，ガスタービンと関係の深い圧縮機の軸シールとして使用されるメカニカルシールについて，その構造，トラブル事例，最近の動向について述べる。

## 2. メカニカルシールとは

メカニカルシールは，回転機器などに使用されるシール装置で，固定側と回転側に軸に対してほぼ垂直なシール端面を持ち，互いに密接しゅう動しながら密封流体の漏れを制限するものであり，ばねと流体圧力を利用してシール端面の摩耗や回転に伴う軸方向のわずかな移動に追従する事ができるような機構を持っている。メカニカルシールの構成要素としては，摩耗などによって軸方向に移動をしないメイティングリングと，軸方向に移動することができるシールリングからなる一対のしゅう動環，二次シール，ばね，トルク伝達部品からなる。図1にメカニカルシールの基本構造例を示す。

メカニカルシールは，優れた耐食性・耐摩耗性・機械的強度を有するセラミックス，カーボン，金属などで構成できる材料選定の自在性と密封対象流体の圧力，温度，回転数に応じて最適な構造や密封面圧が選定できる設計上の自由度から，高速，真空から高圧，極低温から高温，高濃度の固体粒子混合液，高粘度など他のシール機構では対応できない過酷条件にも対応でき，最近では液体のみならず気体や粉体にも適用されている。また，メカニカルシールは適用範囲が広いことに加えて以下の様な特徴を持っており，産業機械に無くてはならない要素である。

- 1) 漏洩量が少ない。
- 2) 寿命が長い。
- 3) 軸動力損失が少ない。
- 4) 自動調整機能があるため，運転中の調整が不要である。
- 5) 特殊設計により，軸移動や偏心にも対応できる。
- 6) 軸やスリーブの摩耗を起こさない。
- 7) ランニングコストが安い。

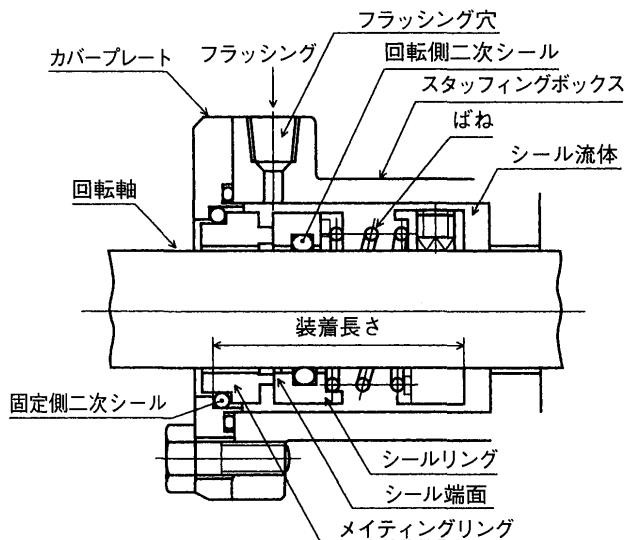


図1 メカニカルシール基本構造例

原稿受付 2007年7月25日

\*1 イーグルブルグマンジャパン(株) 技術部プロメカ技術課  
〒350-0285 埼玉県坂戸市片柳1500

3. 圧縮機用接触式メカニカルシール

3.1 圧縮機用接触式メカニカルシールの構造

遠心圧縮機に使用されているメカニカルシールの構造例を図2に示す。遠心圧縮機ではメカニカルシールを二組使用しその間に圧縮機内のガス圧力よりも0.2~0.3Mpa程度高いシール油を供給することにより圧縮機内ガスの大気への漏洩を防止するダブルシール構造が用いられる。シール液としては潤滑特性、ベアリング油との共有化からタービン油が主に使用されている。圧縮機内のガス成分から耐食上の理由により使用可能なOリング材質が無い場合などは、圧縮機内シールに作動用二次シール(Oリング)を使用しないペローズシールとして対応している。

油冷式スクリュウ圧縮機ではダブルシールの他に図2の大気側シールのみのシングル構造としてシール部へシール油を供給、ローター側へシール油を戻す方法が用いられる場合がある。この場合、シール油の種類は取扱いガスの性状にあわせて決定されると共にシール油中に取扱いガスが含まれるため、メカニカルシールもそれに合わせた設計とすることが肝要となる。

圧縮機は高圧・高速の条件下で使用されるため次の様な配慮を行っている。

- 1) ばねが固定側にあり高速回転時の追従性に優れる静止型構造
- 2) 高圧条件下でも液体圧力による面圧増加が少ないバランス型構造
- 3) シャワーフラッシングとフローガイドによりしゅう動環を全周均一かつしゅう動面を効果的に冷却
- 4) メイティングリング材質には、対摩耗性、低摩擦に優れ『熱伝導率が高い』SiCを採用
- 5) シールリング材質には、カーボンの自己潤滑性とSiCの耐摩耗性とカーボンには無い強度を兼ね備えた弊社オリジナル材質である特殊転換法によるSiC(材質名ES-3)を採用
- 6) シールリングにカーボンよりも高強度の特殊SiC(ES-3)を採用することによりしゅう動面幅を狭く

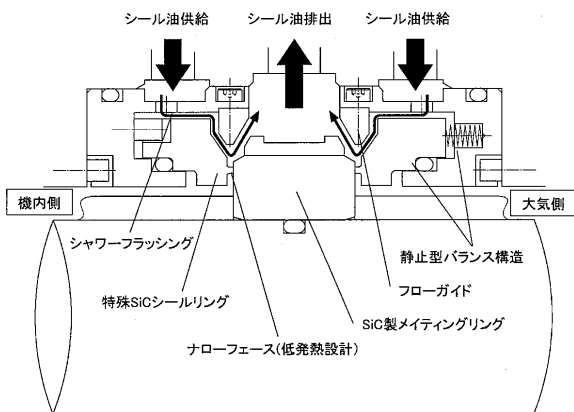


図2 遠心圧縮機用メカニカルシール例

したナローフェース構造にすることが可能となり、メカニカルシールのしゅう動発熱を大幅に低減

7) 放熱性に優れた単体シールリング構造

遠心圧縮機に装着され3年間運転されたシールのしゅう動面の状況を図3に示す。摩耗はほとんど認められず良好な状態を保持している。

3.2 圧縮機用メカニカルシール不具合現象と原因

圧縮機で使用されるメカニカルシールの不具合はシール油の漏れとして現われるが、その漏れを引き起こす主な現象を本項では取りあげる。

3.2.1 しゅう動面でのかけ・割れ・早期摩耗

これらは、潤滑不良条件下で使用された結果として見られる。潤滑不良になる原因として、次の理由が考えられる。

1) シール油量不足

流量計がシール油に対して適正でなく実際に流れている流量が少ない場合や、軸周速で40m/secを超えるような回転数で運転される場合、及び高粘度のシール油を使用する場合にはシールボックス内での油の攪拌発熱によりシールボックス温度が想定以上に上昇していることがある。

2) 使用条件誤り

実際の使用条件が設計条件を上回って使用されている場合。

3) 材料選定誤り

選定した材料の許容PV値<sup>\*1</sup>が実際の運転条件よりも低い場合。

3.2.2 ブリスタ

ブリスタとは、図4に示す様にしゅう動面の一部が膨らみしゅう動面間に隙間を生じさせるものである。この原因としては、しゅう動面に生じる粘性せん断力や、金属含浸カーボンを使用した場合にカーボンと含浸金属の

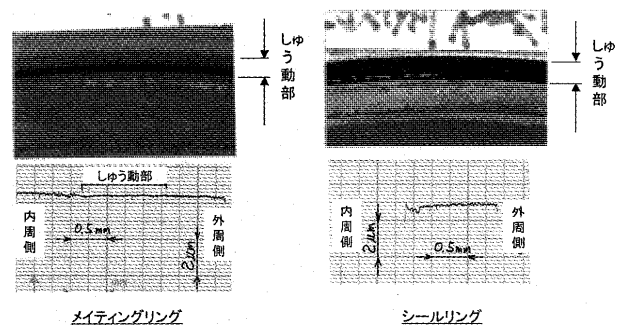


図3 3年間使用後のしゅう動面の例

\*1 PV値：しゅう動面の接触面圧(P)としゅう動速度(V)を乗じた値で、しゅう動面に加わる負荷を表す。しゅう動材料によりその限界値が決まっている。

熱膨張係数の違いなどによって発生することが確認されている。<sup>(1)</sup>本現象も前項と同様に

- 1) しゅう動面が潤滑不良
- 2) 実際の使用条件が材料自体の許容PV値を超えるような高負荷条件の場合において認められる。3.1項5)で述べた弊社独自開発の特殊転換法によるSiC(ES-3)は極めてプリスタに強い材料であり、カーボン材料ではしゅう動面の潤滑状態を改善してもプリスタの発生を抑える事ができない様な高PV値条件においては、本材料への変更が対策として非常に

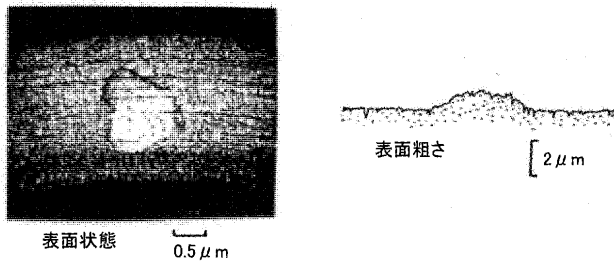


図4 しゅう動面上のカーボンプリスタ

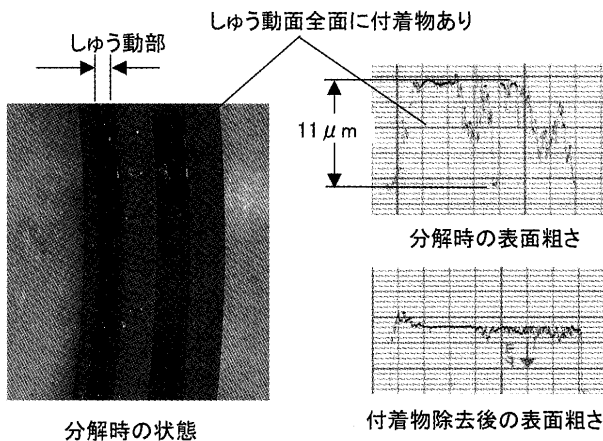


図5 しゅう動面上の付着物例

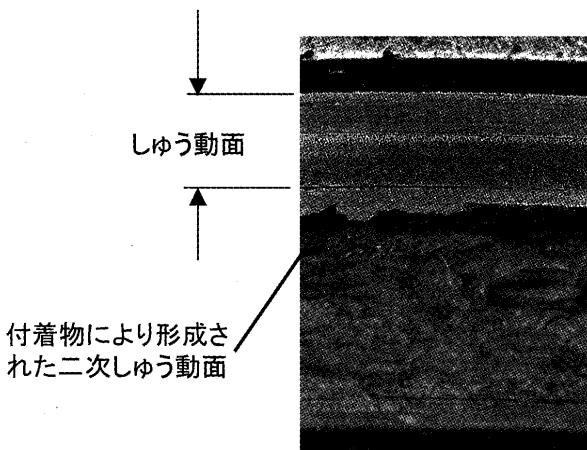


図6 二次しゅう動面例

有効であり、多くの圧縮機メーカー殿、ユーザー殿からも御好評を頂いている。

### 3.2.3 しゅう動面への付着物、及び二次しゅう動面の生成

しゅう動面への付着物の例を図5に、二次しゅう動面の例を図6に示す。しゅう動面に付着物や二次しゅう動面を生じる原因としては次の要因が挙げられる。

#### 1) シール油添加剤の影響

通常シール油として使用される油には酸化防止剤など種々添加剤が入っている。しかし、添加剤の中には、酸素等との結合によって反応生成物(スラッジ)を生じるものがありそれがしゅう動面に付着する事が確認されている。図5、及び図6に示した付着物や二次しゅう動面の成分分析を行うとリン、硫黄、亜鉛などメカニカルシール部材には含まれない成分元素が検出されており添加剤由来のものと考えられる。

しかし、添加剤成分についてはオイルメーカーの極秘事項であり問い合わせに対して開示されることは無く、また同じグレードのシール油であっても成分の変更についてユーザーへ告知されることが無いことから実際に添加剤が原因で問題が発生した場合には、真の原因究明が難しいのが実情である。

尚、タービン油中の添加剤がしゅう動面に付着物を生成する可能性があることはメカニカルシールの規格<sup>(9)</sup>でも指摘されている。

使用において、シール油の銘柄を変更した後や、シール油交換後に今まで良好であったシールに付着物や二次しゅう動面を生じる様になった場合には、添加剤の影響について検討すべきであり実際に他銘柄へのシール油の交換が有効な場合が多い。弊社の事例でも、3~4ヶ月毎に付着物を生じ多量漏れを発生していたシールが、シール油の銘柄を弊社推奨に変更後、2年以上運転されている例がありシール油の選択はシールの安定運転に大きく影響する。

#### 2) シール油の劣化

長期間にわたるシール油の使用は、シール油自体の劣化の他に、シール油循環装置内の配管壁やタンク壁にシール油中に発生したスラッジの堆積を引き起こすことがある。一度堆積してしまうと新油交換後にシール油中に堆積物からスラッジ成分が溶け出し劣化させ、しゅう動面で付着物や二次しゅう動面を生じやすくなることもある。

不具合を未然に防止するためには、シール油の粘度等の基本スペックに異常が無くとも、1~2年毎に定期的にシール油全量を交換するのが配管内壁への堆積も生じにくく長期間良好な運転結果を残しており推奨している。シール油の一部交換は、弊社経験上効果が少なく推奨できない。

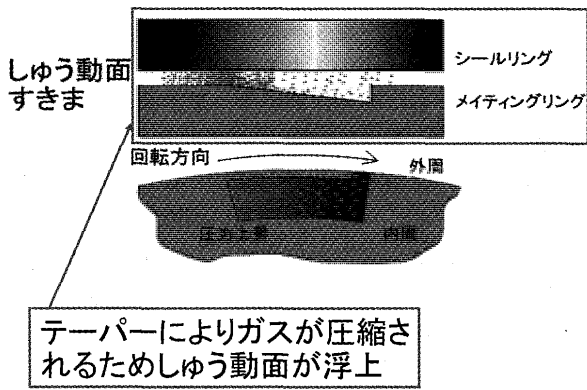


図7 テーパステップの浮上原理

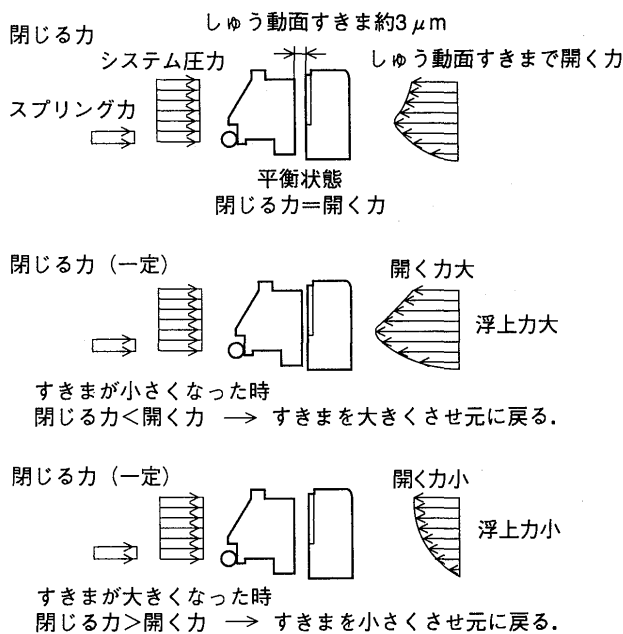


図8 ドライガスシールの隙間調整原理

3) 冷却不足

シール油量が足りないなどの理由によりシール部温度が上昇すると1)にて述べたシール添加剤の生成反応が促進され多量の付着物を生じたり、シール油の劣化が早まり付着物や二次しゅう動面を生じやすくなる。3.2.1 1)にて述べたが高速回転時の油の攪拌発熱による温度上昇には注意が必要である。

3.3 圧縮機用メカニカルシールの最近の動向

近年、メカニカルシールの高圧化の要求が急速に高まっている。油冷式スクリュウ圧縮機においてはガスタービンの高効率化に伴い適用圧力の高圧化が進んできており10Mpa対応も可能となってきている。<sup>[2],[3]</sup>この他には、冷凍機冷媒のCO2化関連や、地球温暖化対策のための超臨界CO2地中埋設用ポンプ用メカニカルシールなどが高圧用途として研究されている。

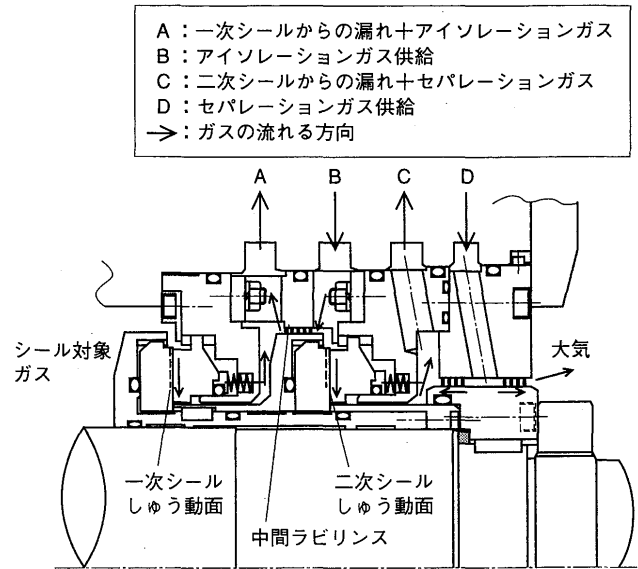


図9 ドライガスシールの使用例

4. 非接触型メカニカルシール (ドライガスシール)

4.1 非接触型メカニカルシールの作動原理

非接触型メカニカルシールでガスを対象とするシールは一般的にはドライガスシールと呼ばれておりしゅう動面に形成されたスパイラル溝やテーパステップなどの動圧溝を設けて、回転力によりしゅう動面に隙間を発生させるものである。テーパステップの浮上原理を図7に、ドライガスシールのしゅう動面の隙間調整原理を図8に示す。<sup>[4]</sup>通常状態においては、流体動圧力としゅう動面内に発生する圧力分布の和である開く力と密封圧力による閉じる力の平衡点において運転される。

もし、外乱によりしゅう動面の隙間が小さくなれば、しゅう動面内の圧力分布は増大ししゅう動面隙間は拡げられて元の隙間に戻る。

4.2 適用例

図9は石油精製プラントにて使用されている水素ガス遠心圧縮機における使用例である。通常の使用においてはシール対象ガスのシールは全て一次シールが行い、二次シールは一次シール使用時のバックアップ用として機能している。バックアップシールを設けたタンデム配列は、石油精製、天然ガス、化学プラントにおける遠心圧縮機用に標準的に用いられている。

現在では、さらに環境問題及び安全性向上を考慮し、一次シールと二次シールの間にラビリンスを設けて二次シール側より低圧のアイソレーションガス(主に窒素ガス)を供給し、機内ガスの大気への漏洩を完全に防ぐ構造が主流となっている。大気側に供給されるセパレーションガスは二次シールから漏洩するガスを大気に放出させないことと、大気側よりベアリング油などの異物がシール部に浸入することを防止するためであり、通常は

窒素ガスが用いられる。<sup>5)</sup>

### 4.3 最近の動向

#### 1) 安全性向上

回転側のしゅう動材は、タングステンカーバイドやシリコンカーバイドなどのセラミックス材料が使用されているが、これらは脆性材料であることから高速接触しゅう動などの強い外乱が加わると一瞬のうちに破壊が生じ、機器に重大なダメージを与える場合がある。<sup>6)</sup>一方で、遠心圧縮機は高速、大径化(高周速化)が進んでおり回転部品に加わる負荷はますます厳しくなっている。これに対して延性材料であるSUS系材料にしゅう動特性に優れたTiNコーティングを施したしゅう動材が開発、実用化され広く使用されている。<sup>6), 7)</sup>

#### 2) 高圧化

地球温暖化ガス削減のため、プラントより排出されるガスを地中に戻すガスインジェクション用の遠心圧縮機用に425barGの超高压用ドライガスシールが既に開発実用化されている。<sup>8)</sup>

#### 3) LNG用途

近年のLNG需要の高まりによってそれに対応し、 $-170^{\circ}\text{C}$ のガスをダイレクトにシール出来るものや、軸径 $\phi 353\text{mm}$ 対応の大径ドライガスシールが実用化されている。<sup>8)</sup>

### 5. 終わりに

ガスタービンを含め産業機器の性能向上は目覚ましいものがあるが、それに伴いメカニカルシールへの要求も急激に増大している。圧力、回転数、温度適用範囲の拡大は勿論であるが、機器性能向上のため次々に開発される油等の流体に対する適性など、要求される項目も多岐にわたってきている。今後、更に高い信頼性と性能をメカニカルシールが実現するためには、シールメーカー単独では限界があり、機器メーカー、ユーザーを含めた情報交換による総合的な協力が不可欠となっている。

### 参考文献

- (1) MASAMI MIYAZAWA, ZENYOSHI UCHIBORI: STLE VOLUME44, (1988-6), P520-526
- (2) 天野靖士, 神戸製鋼所技報/Vol.55 No.2 (Sep.2005)
- (3) 日刊工業新聞, 2006年3月28日1面
- (4) 伊藤正伸, ターボ機械, 23, 4 (1995) 51
- (5) 工業調査会, これでわかるシール技術NOK株式会社編 (1999), P247
- (6) TAKAO TAKEUCHI, TADASHI KATAOKA, HIROSHI NAGASAKA, MASANOBU ITO: 27TH TURBOMACHINERY SYMPOSIUM (1998), P40
- (7) <http://www.ekk.co.jp>
- (8) <http://www.burgmann.com>
- (9) API STANDARD 682 2nd EDITION (July, 2002), P115

特集：トライボロジー

## 大容量ガスタービンのシール技術

正田淳一郎\*<sup>1</sup>  
MASADA Junichiro安威 俊重\*<sup>1</sup>  
AI Toshishige荒木 勝人\*<sup>1</sup>  
ARAKI Masato

キーワード：産業用、ガスタービン、シール、ラビリンスシール、ブラシシール、クリアランス、プレスワール

## 1. まえがき

地球温暖化問題は、人類存続において最も重要な環境問題のひとつであり、2005年2月に温室効果ガス排出規制として京都議定書が発効された。日本は2008年から2012年までに1990年CO<sub>2</sub>総排出量の6%削減目標の達成が必要となり、資源やエネルギーの有効利用が強く要求されている。このような背景からエネルギーの高効率利用及び低CO<sub>2</sub>排出という観点で、天然ガスを主燃料としたガスタービンコンバインドプラントに対する関心がますます高まってきている。

コンバインドプラント発電設備の主機となるガスタービンは、1980年代初期に大容量・高効率化されたタービン入口温度1150℃級M701D形が開発され、エネルギー消費量の低減、排ガスの低公害化を達成した。1980年代後期にはタービン入口温度1350℃級M501F形、1997年には更にコンバインドプラント効率を高めた、世界最高のタービン入口温度1500℃級M501G形ガスタービンが開発され順調に商業運転を続けており、大幅なCO<sub>2</sub>削減に貢献している。図1にタービン入口温度とコンバインドプラント効率(LHV)を示す。コンバインドプラント効率は、1150℃級(D形)、1350℃級(F形)及び1500℃級(G形)と改良され、60%に迫る勢いである。

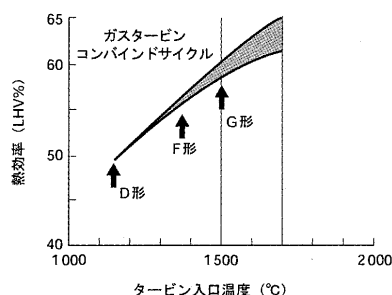


図1 タービン入口温度とコンバインドプラント効率

本文では、ガスタービンコンバインド効率を高めることに寄与してきた産業用ガスタービンのシール技術について紹介する。

原稿受付 2007年7月10日

\*1 三菱重工業株式会社 高砂製作所

〒676-8686 兵庫県高砂市荒井町新浜2-1-1

## 2. ガスタービンの高効率化におけるシール技術の役割

ガスタービンエンジン及びコンバインドプラント効率を向上させるためには、タービン入口温度の上昇、圧縮機やタービンの要素効率向上、及びタービン部の冷却空気量削減が重要であり、これらの技術向上が効率向上の鍵を握っている。タービン部に使用される冷却空気は、高温に晒されるタービン翼の冷却に使用される空気と、漏れ空気(シール空気)に分類される。

ガスタービンにおいてシール技術に求められる主な役割は、高温部品ではない箇所への高温ガスの侵入や軸受部潤滑油の漏洩を必要最小量のシール空気で防止すること、圧縮機、タービン動翼のチップ部クリアランスを低減し、作動流体のチップリークを低減することによって高効率化に寄与することである。

また高効率であるだけでなく、長期に渡って安定的に運用できる信頼性に対するニーズは強く、特に開放点検の機会が少ない大容量発電用ガスタービンのシール設計においては、各部シールの経年的な劣化特性を十分に考慮した設計が肝要である。

シール技術は高圧力化してきたガスタービンでは特に重要な開発技術であり、技術力向上による漏れ空気削減のために、これまで数々の研究/開発がなされてきた。その一端を記す。

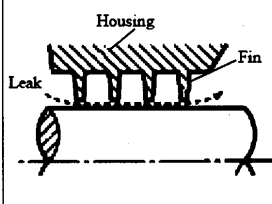
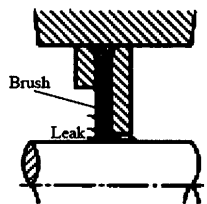
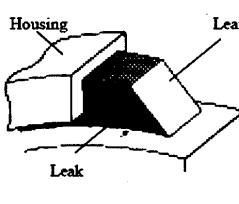
## 3. 各シールとその特徴

大容量ガスタービンに適用されている主要なシールの特徴について、それぞれ紹介する。

## 3.1 静止-回転部

高温ガスを作動ガスとする回転機械であるガスタービンにおいて、静止構造物と回転するロータとの間に生じる隙間は避けられないものであるが、特に高温ガスが通過するガスパスのように高温部品で形成された箇所とは異なる場所では隙間を冷たいシール空気で満たし、高温ガスの侵入を防止する必要がある。この際必要となるシール空気を削減するために用いられる代表的なシール要素として、まずラビリンスシール、ブラシシール及びリーフシール(表1)を筆頭に記述する。

表1 ラビリンスシール、ブラシシールとリーフシールの比較

	Labyrinth seal	Brush seal	Leaf seal
Conceptual figure			
Relative leak amount	100 % (gap 0.5mm, 4 stage)	40 % (1 stage)	30 % (1 stage)
Seal type	Non-Contact	Contact	Non-Contact at Operation Contact at Shut Down
Differential pressure	-	Max. 0.5 MPa	Max. 1.0 MPa
Wear	No wear	Wear	Negligibly small wear

3.1.1 ラビリンスシール

ラビリンスシールは、非接触で流体の漏れを低減するための基本的な機械要素である。古くから高速回転機械で不安定振動を発生する要因のひとつとして着目され、検討されてきたが、1970年代よりラビリンスシールの動特性に関する研究に着手し、理論解析や種々の実験研究を実施したうえで、大容量の高圧蒸気タービンに適用し、漏れ空気量の削減に貢献してきた。

ガスタービンにおいても今日に至るまで長い間、漏れ空気削減のためだけでなく、軸受周りの潤滑油漏洩防止のためのシールとしても使用されるなど様々な箇所に適用されているシール要素である。

ラビリンスシールのシール性能は3.1.3で述べるリーフシールに比べると劣るがシンプルで低コストであるという特徴がある。

またこのように歴史の長いラビリンスシールであるが、現在でも更なるシール性改善のため、世界的にCFD解析を取り入れた様々な研究がなされている(図2, 3)。

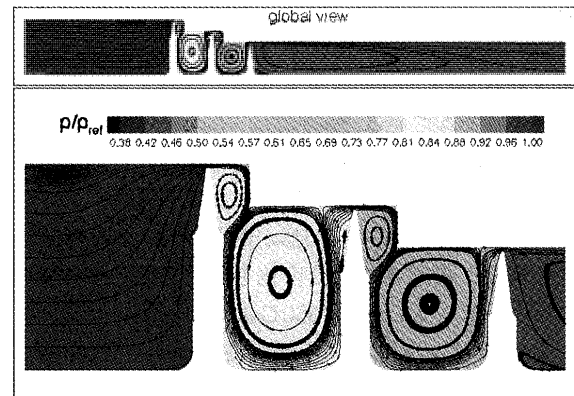


図3 ラビリンスシールCFD解析例<sup>6)</sup>流線と圧力コンター

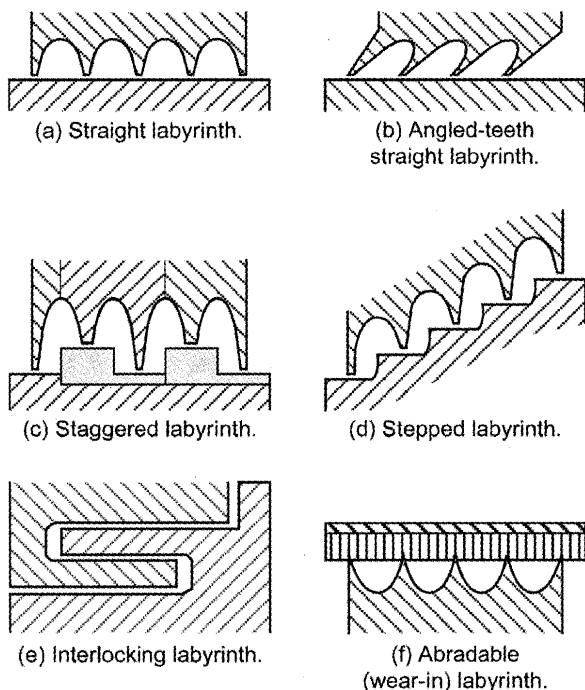


図2 一般化されたラビリンスシール形状<sup>10)</sup>

3.1.2 ブラシシール

ブラシシールは接触式シールであり、極細の金属製ワイヤから成るブリストルをロータ回転方向に傾けて設置したもの(図4)で、このワイヤ層で流体の漏れ通路を塞ぐことによって流体の漏れを低減している。主にタービン段間部でラビリンスシールと併用されることが多い。

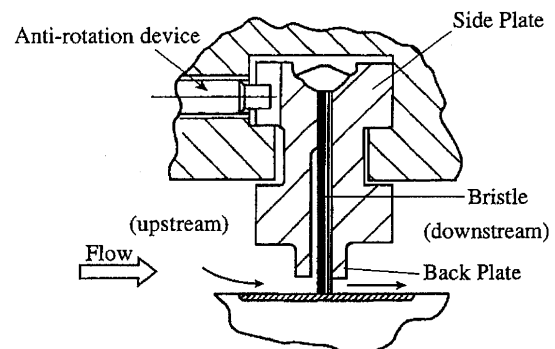


図4 ブラシシールの構造

一方、非金属製ワイヤのブラシシールを比較的低温環境雰囲気下にある吸気側軸受部に適用している例もある。<sup>11,12)</sup>



世界的には同じ接触式シールで比較的新しいものとして、フィンガーシールがある(図5)。漏れ空気量は従来ラビリンズシールの1/3から1/2, 動力損失はブラシシールと同等で、コストはブラシシールの40%から50%と見積もられているとの報告がある。

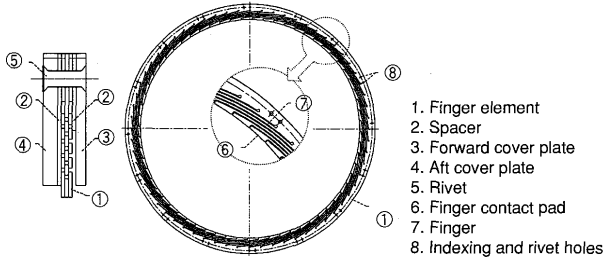


図5 フィンガーシールとその構成要素<sup>(9)</sup>

3.1.3 リーフシール

リーフシールは非接触式で、2000年初頭から当社蒸気タービン要素開発の一環で研究・開発され、蒸気タービンだけでなく、ガスタービンへの適用が図られたものであるが、薄板(リーフ)を多層に重ね、周方向に傾斜させた構造で、ロータが回転するとリーフ先端とロータとの間に作用する動圧効果によってリーフ先端が微量浮上するという特徴を持つ(図6, 7)。

ブラシシールは負荷運転中の定常クリアランスを最小とするため、新品時のシール性能は良好であるものの起動停止の非定常時はロータと接触しており、ワイヤ層の摩耗による経年的なクリアランス増大による漏れ空気量増大が懸念されるのに対して、浮上して非接触となるリーフシールは高いシール性能を長期に渡って維持できるという点で有利である。

これまで種々の要素検証(図8, 9)を実施し、ラビリンズシールよりも良好なシール特性であることを確認している。また実機による実証試験でも長期に渡り高いシール性能を維持することを検証済みである(図10)。

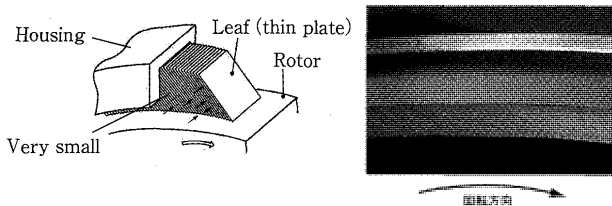


図6 リーフシールの構造

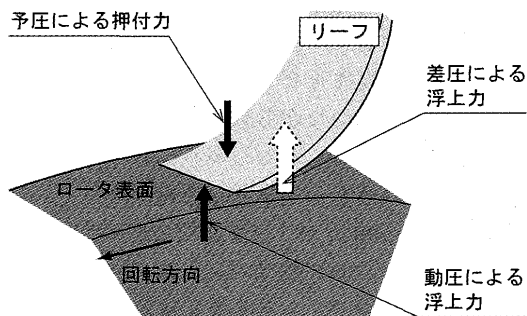


図7 リーフシール作動原理

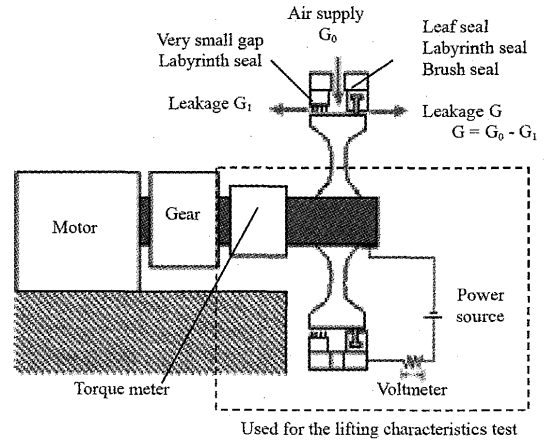
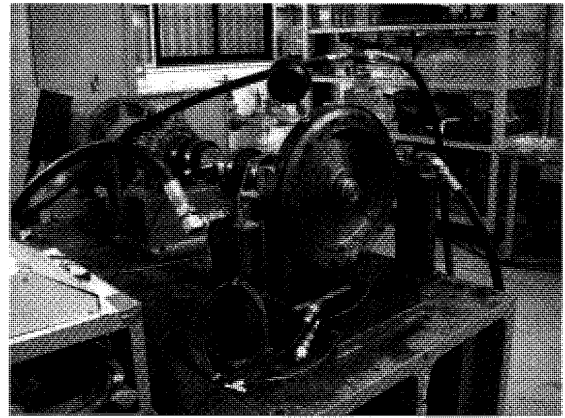


図8 回転シール試験装置

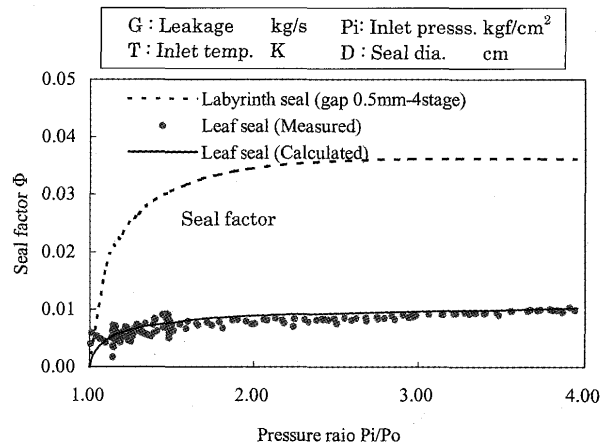


図9 圧力比とシールファクターの相関

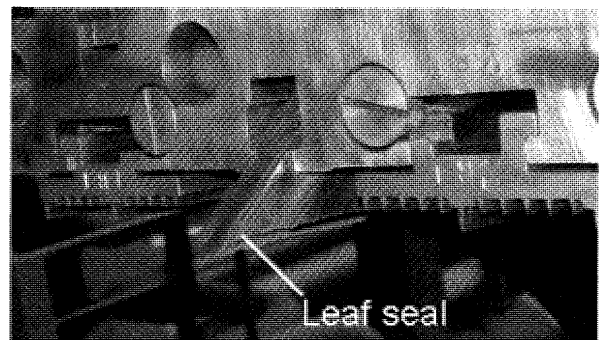


図10 実証運転後のリーフシール外観

3.1.4 アブレーダブルシール

アブレーダブルシールは、接触を許容する（接触時も低発熱で軸のサーマルアンバランスを生じない）事でシールクリアランスの低減を目論んだもので、主に圧縮機、タービンのチップ部及び段間部に適用されている。

図11, 12及び表2, 3に示されるようにアブレーダブル材としてハニカムシールやアブレーダブルコーティング等様々なシール材で摺動時切削性やエロージョンに対する特性が検討されており、使用環境温度や摺動部ロータ周速等に応じて適切な材料を選択する必要がある。

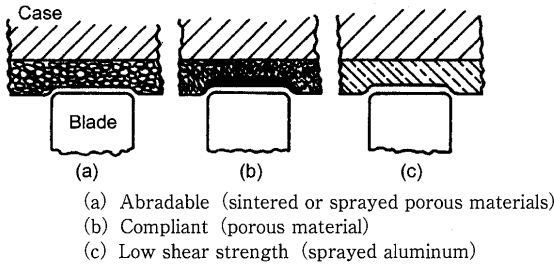


図11 静止回転境界部シールの各材料模式図<sup>(8)</sup>

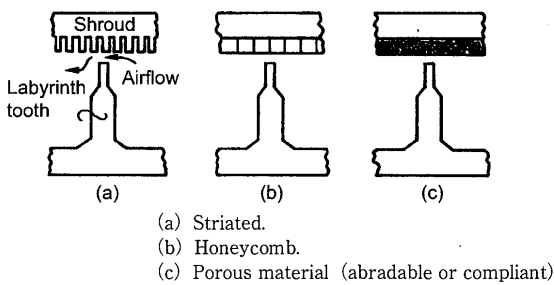


図12 圧縮機内側シュラウド<sup>(8)</sup>

表2 CHAPPEL他によって使用されたアブレーダブル材<sup>(6)</sup>

Fibermetal	Density (%)	Ultimate tensile strength (psi)
1	22	1050
2	23	2150
Honeycomb	Hastelloy-X, 0.05-mm foil, 1.59-mm cell	
Nickel Graphite	Sulzer Metco 307NS (spray)	
CoNiCrAlY/hBN/PE <sup>a</sup>	Sulzer Metco 2043 (spray)	

<sup>a</sup>Hexagonal boron nitride (hBN) acts as a release agent; polyester (PE) controls porosity

表3 耐摩耗性におけるアブレーダブル材の優劣順位<sup>(6)</sup>

Material	Abradability		Erosion
	High-speed	Low-speed	
1050-psi fiber metal	1	1	3
2150-psi fiber metal	1	1	1
Hastelloy-X honeycomb	2	3	2
Nickel graphite	3	1	2
CoNiCrAlY/hBN/PE	3	3	1

Where 1 = best and 3 = worst.

3.1.5 Pre-swirlノズルシステム

Pre-swirlノズルは動翼冷却空気を静止系から回転するロータ内へ供給する静止部経路に設置され、冷却空気にロータ回転方向と同じ向きにスワールを付与し、回転系導入時のポンピングロスと低減すると同時に、圧力損失を低減している。Pre-swirlノズル出口では圧力エネルギーの一部が膨張による流出で速度エネルギーに変換され、静圧が低下するが、これによってノズル下流に配置されたシールの前後差圧を小さくすることができ、漏れ空気量を削減できる利点がある（図13, 14）。

また、外部クーラを通して動翼冷却空気を冷却している場合は、Pre-swirlノズル通過時の膨張による冷却空気温度の低減効果も有り、この外部クーラ廃熱を低減できるという利点もある。

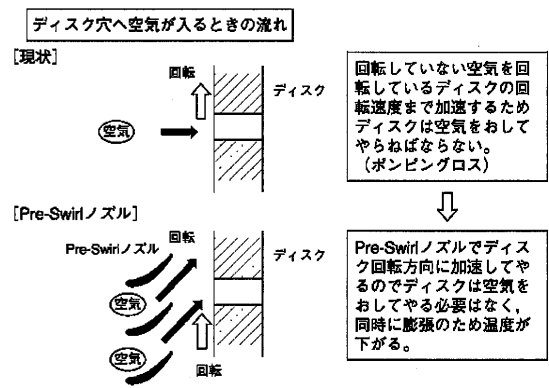


図13 ロータディスク内へ空気が入るときの流れ

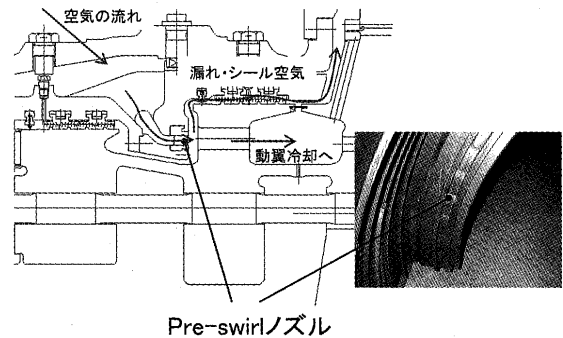


図14 Pre-swirlノズル周り空気の流れ

3.1.6 リムシール

リムシールは、高温ガスフローパスに近い動静翼間のハブ側隙間におけるシールで特にガス温度の高い前方段では高温ガスが内側キャビティ内へ進入した場合にロータディスク損傷等につながる恐れがあるため、特に重要なシールである。一方、リムシールにおけるシール性能はその複雑な流れ場から定量的な評価が難しく、近年は3次元非定常CFD解析やリグ試験でのPIV計測等の先端技術を取り入れた評価に航空エンジンメーカーを始め各社取り組んでいる状況で、シール性に優れるシール形状について研究・開発がなされている（図15, 16）。

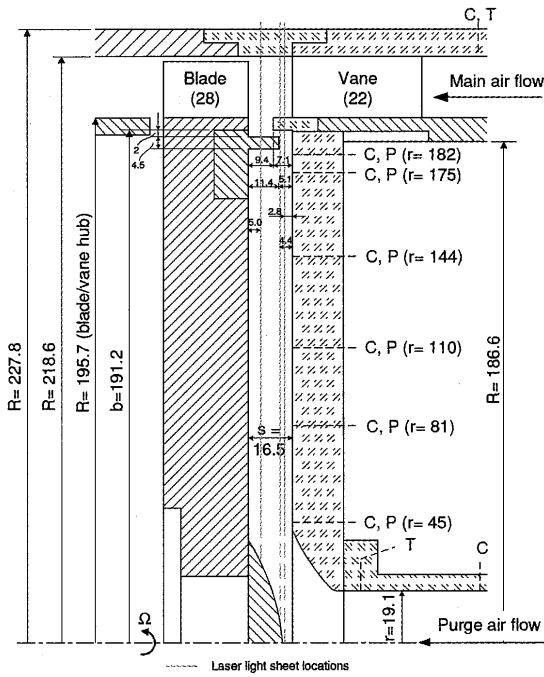


図15 リムシール試験装置例<sup>9)</sup>

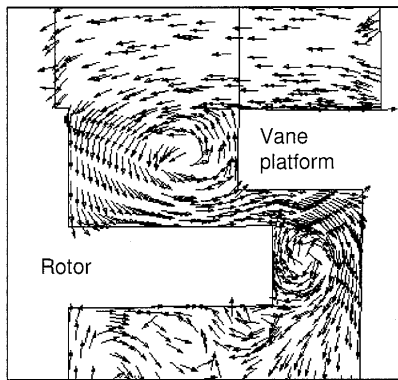


図16 非定常3次元CFD解析例<sup>9)</sup>r-x平面上の速度ベクトル

### 3.2 静止部

基本的に静止部品間の周方向隙間はシール板を適用して隙間を埋めているが、部品間の軸方向隙間に関しては、その必要性に応じてE-シールや、コーダルシール等を適用している。

E-シール (図17, 18) は、断面が「E」字型で変位追従性に優れる利点があり、パーツ間の軸方向隙間が熱伸び差により運転中に大きく変化するような箇所に適用され、漏れ空気の削減に寄与している。

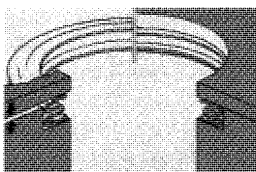


図17 E-シール模式図 (EEA社ホームページより)

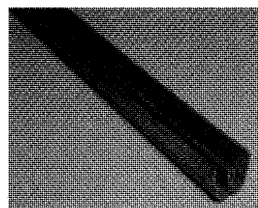


図18 E-シール写真

コーダルシール (図19) は、航空エンジンで実績のあったものであるが、運転中の翼倒れに対して翼とサポートリング間で静翼もしくはサポートリングにコード (弦) を張ることで、パーツ間の線当たりを確保し、従来点当たりとなっていたことによる漏れの増大を防ぐことができる。

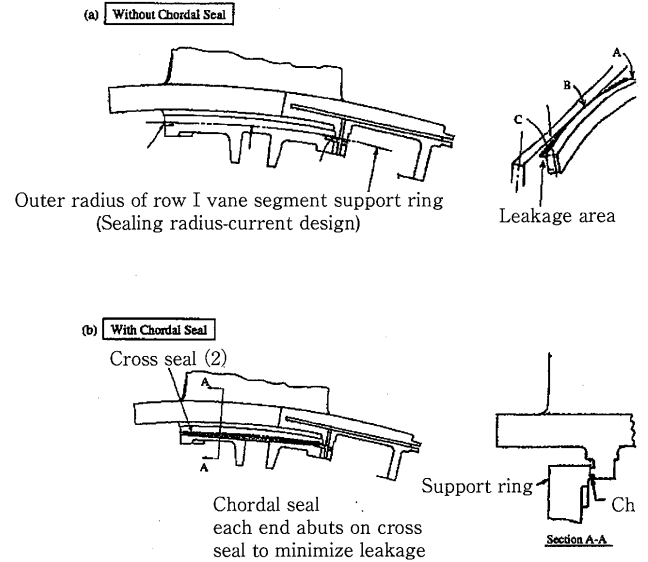


図19 コーダルシールの構造

### 4. 解析技術と検証

シール設計におけるCFD, FEM解析の役割は年々高まりを見せており、1次元のフローネットワーク解析と合わせて、必要に応じて3次元CFD解析を実施している。

例としてPre-swirlノズルの開発においては、ノズル流出空気の周方向静圧分布やスワールの減衰等1次元解析だけでは評価が困難な部分について3次元CFDを有効に活用し、フローシステム評価の推定精度向上に努めている (図20, 21)。

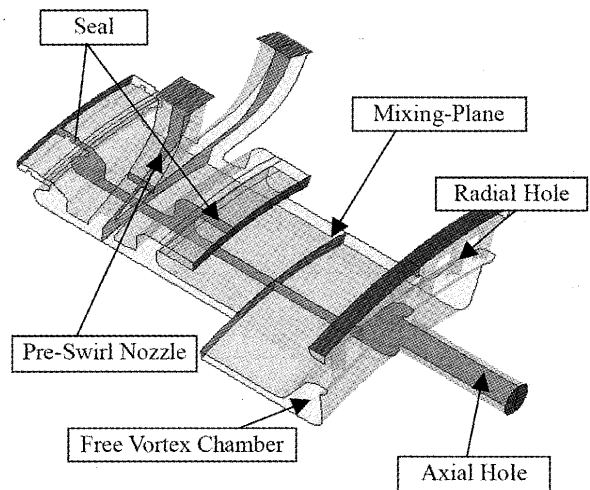


図20 Pre-swirlノズルシステムCFD解析モデル

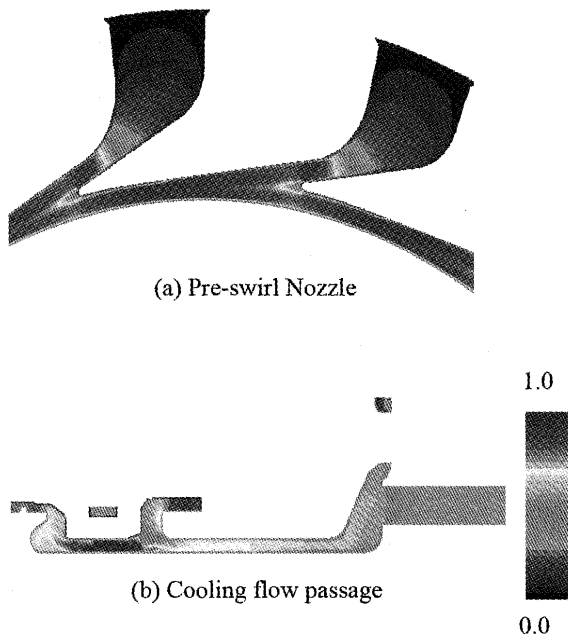


図21 CFD解析結果周方向速度コンター

開発したシール要素及びシステムは、コールドフロー試験で圧力、温度及び流量等目的に応じた計測を実施し、流量係数或いはシールファクターを確認したうえで、フローシステムとしての健全性を検証している (図22, 23)。

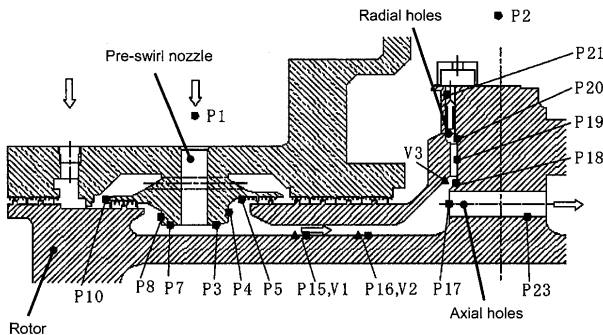


図22 リグ試験圧力(P)、流速(V)計測位置断面図

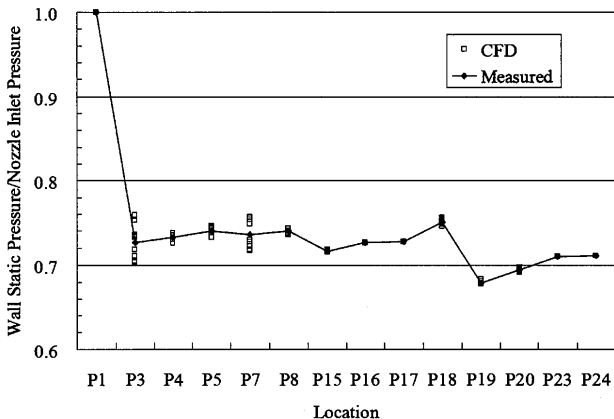


図23 CFDと実測の壁圧比較

また、シール設計においては組立時COLD状態から運転中のHOT状態に至るまでの非定常クリアランス挙動を抑えておく必要があり、このため起動、停止を含む非定常での車室、ロータの熱伸び解析を通じて、動翼チップ部クリアランスやタービン段間部シールクリアランス等に関して最適なシール設計を行っている (図24)。

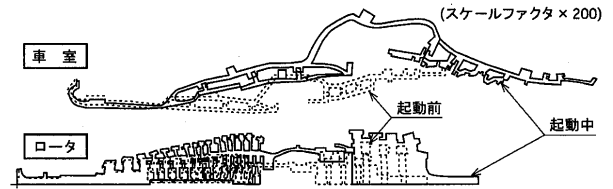


図24 非定常変形解析

### 5. あとがき

地球温暖化が現在のペースで進行すれば、最低気温が東京で27℃を上回る極めて暑い夜が、2030年には20世紀末に比べて3倍に増えるとの予測を、国立環境研究所が最近まとめたとの新聞記事もあり、地球温暖化の問題はもはや遠い将来の問題ではない。

これまで、高温ガスタービンを主機とするコンバインドプラント効率はガスタービン入口温度の上昇により飛躍的に改良され、その高効率化及び低公害化により地球温暖化対策に貢献してきたが、温暖化に対する危機意識は世界的にも日々高まりを見せており、このような世界動向のもと更なる高効率化を図ることが次世代のガスタービン開発の使命であるといえる。そのなかでシール技術においても、より高性能で信頼性の高いレベルを目指して、継続した改善活動への取り組みが必要である。

### 参考文献

- (1) 神吉博他, 三菱重工技報, Vol.26, p.140-144
- (2) 渡辺英一郎他, 三菱重工技報, Vol.40, p.212-215
- (3) 荒木勝人, 日本ガスタービン学会誌, Vol.34, p.19-24
- (4) Akita他, ASME 2001-GT-0553
- (5) B. Soemarwoto他, ASME GT2007-27905
- (6) D.Chappel他, AIAA 2001-3479
- (7) Iwasaki他, CIMAC Congress 2004, Paper No.237
- (8) L. Ludwig他, ASLE Trans, vol.23, P.1-22
- (9) M. Proctor他, Journal of Propulsion and Power, vol.20, p.312-318
- (10) Nakane他, ASME GT-2002-30243
- (11) N. Bhate他, ASME GT2004-54296
- (12) R. Burcham他, NASA SP-8121
- (13) R. Chupp他, NASA/TM-2006-214341
- (14) R. Roy他, ASME GT2007-27671
- (15) V. Laurello他, ASME GT2004-53090
- (16) V. Laurello他, ASME GT2006-90182

特集：トライボロジー

## ガスタービン発電機用減速機

坂本 健夫\*<sup>1</sup>  
SAKAMOTO Takeo桜井 輝明\*<sup>1</sup>  
SAKURAI Teruaki

キーワード：ガスタービン減速機，フレキシブルピン

### 1. はじめに<sup>(1)</sup>

歯車変速機が機械装置の中でどのような役割を果たしているのか、その必要性について簡単に述べる。

ポンプ・圧縮機や発電機のように他の回転動力から駆動されることにより仕事をすることは出来るが、自ら回転することの出来ない機械を被動機と呼ぶ。タービンや電動機のように被動機を回転させる機械を原動機と呼び、被動機には原動機が必要である。

被動機や原動機にはその種類や仕様によって適切な回転速度がある。ポンプや圧縮機にはその使用条件によって最適回転速度があり、発電機や電動機はその極数と周波数によって回転速度が決まり、タービンにも出力等によって最適な回転速度がある。一般的に被動機と原動機の最適な回転速度は合致しないことが多い。そこで、両者の回転速度を最適回転速度の下で運転させる装置が変速機であり、最も効率よく変速する装置として歯車変速機がある。

歯車変速機には、

- ① 原動機の回転速度を被動機の最適な回転速度を合わせる 他にも
- ② 原動機と被動機の回転方向を合わせる
- ③ 回転軸の方向を変える

等の役割がある。

(株)日立ニコトランスミッション（以下、日立ニコ）は、上記の役割を持つ歯車変速機その他、トルクコンバータ等の流体変速機や、摩擦板等を用いた多板クラッチ等を組み合わせ原動機と被動機の間で最適な回転速度に変換する変速装置、原動機から一部の動力を取出しいくつかの被動機に分配する動力分配装置、回転速度は変えずに回転方向や向きを変換する装置など、種々の変速装置を世に送り出している。

歯車変速機には平行軸歯車変速機、遊星歯車変速機やかさ歯車変速機などの種類があり、それぞれメリット・デメリットがある。

平行軸歯車変速機は他の歯車変速機と比較しても構造

が簡単で部品点数が少なく信頼性が高いため、産業界で多く使用されている。大容量の変速機の多くは平行軸歯車変速機である。

遊星歯車変速機は、入出力軸が同芯になりコンパクトな機器配置が可能である。個々の部品が小さく製作しやすく、変速機自体も小型化することが可能で中容量の変速機に多く採用されている。しかし構造が複雑となりメンテナンス性が悪い一面もある。

また、一般に歯車変速機の効率は1段減速（或いは増速）で97%~98%程度である。しかし伝達容量が小さい汎用変速機を伝達動力に余裕のある選定で使用した場合、1段減速当りの効率が92%~93%になることもある。

大容量変速機の場合、軸受や歯車は専用設計とし熱損失を最小とすることで、99%程度の効率になる。

### 2. 変速機の大容量化について

歯車変速機には高速化・大容量化が常に要求されており、特に火力発電所用平行軸歯車変速機に対する大容量化の要求は強い。歯車減速機を大容量化するためには、

- ① 歯車の径化→歯車の高周速化
- ② 材料強度の向上 等が必要である。

材料強度の向上は、鉄鋼メーカーに依存する所が大であり当面は期待できそうにない。そこで、減速機の大容量化には歯車の高周速・高面圧化技術が重要になる。しかし、歯車の高周速・高面圧化には、歯面の損傷、振動・騒音の増大が考えられるため、これらの課題に対応する歯面焼付き限界評価技術、動荷重の評価技術等が必要となる。

日立ニコでは、ガスタービン発電機用減速機として国内最大級の伝達動力90MW用を始め、中小容量ガスタービン発電機用歯車変速機を製作しているので以下に紹介する。

### 3. ガスタービン発電機用減速機の概要

日立ニコのガスタービン発電機用減速機について紹介する。

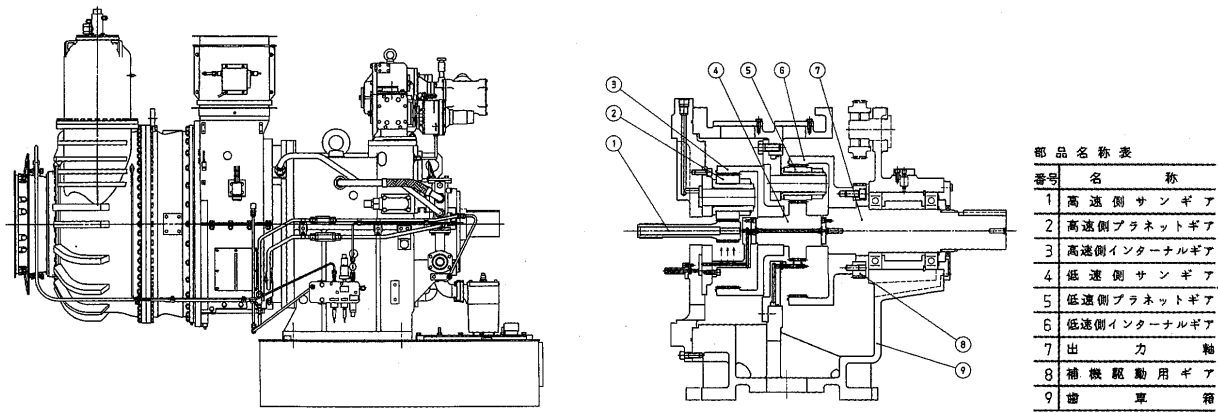
#### 3.1 中小容量ガスタービン用減速機<sup>(6)</sup>

中小容量ガスタービン発電機用減速機について述べる

原稿受付 2007年7月10日

\* 1 (株)日立ニコトランスミッション

〒331-0811 さいたま市北区吉野町1-405-3



左図はガスタービンと組合せた全体図、右図は遊星歯車変速機の構造図

図1 中型ガスタービン用遊星歯車変速機

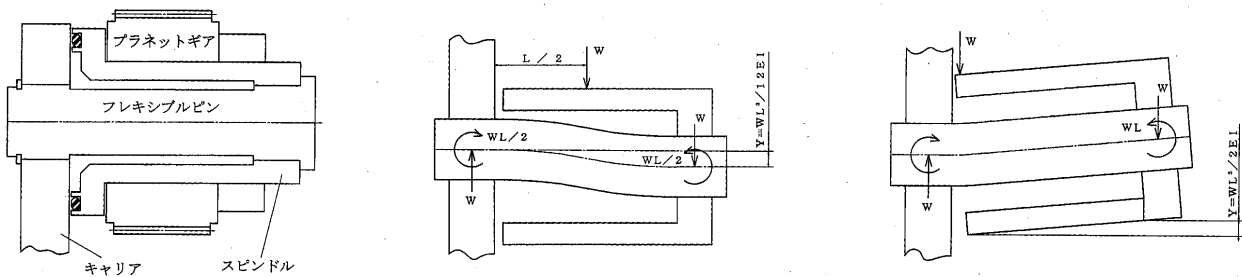


図2 フレキシブルピンの荷重等配機構

(ここでは数百kW～数千kW位の容量を中小容量と呼ぶ)。中小容量ガスタービンは回転速度が高く数千～数万 $\text{min}^{-1}$ となり、減速機は小型化に有利で高減速比が得やすい遊星歯車変速機を採用している。多くの場合ガスタービンは減速機のギヤケースに直接片持ち状態で取り付けられ、動力はガスタービン出力軸に設けられたスプライン継手を介し減速機に伝えられる。

遊星歯車変速機は複数の歯車が同時に噛合う構造で動力を分配し伝達することから、遊星歯車では動力分配機構は性能を左右する重要な機構である。

そのため、日立ニコのガスタービン用遊星歯車減速機には荷重等配機構として、「フレキシブルピン方式」を採用している。

### 3.1.1 荷重等配機構について

遊星歯車変速機は複数の歯車が同時に噛合うため加工誤差・組立誤差等によって(各プラネットギヤに)荷重不均衡が生じる。この荷重不均衡は伝達効率、耐久性の低下につながるため、高い製作精度と荷重等配機構が必要となる。

「フレキシブルピン方式」の荷重等配機構はプラネットギヤ支持部材をフレキシブルな構造とし、荷重が掛かるとたわむ片持ち梁の原理を応用している。荷重を受けた場合のフレキシブルピンの動作は次のようになる。(図2参照)

#### ① 中央荷重の場合

荷重が歯面に均一に分布している場合、ピンの中央部に集中荷重が掛かっている状態と同じでピンは二重片持ち梁としてたわみ、プラネットギヤの他の歯車に対する平行度は損なわれない。加工あるいは組立の誤差でフレキシブルピン間に相対位置誤差があった場合、ここに配置されたプラネットギヤはその他のものよりも多くの荷重を受けることになり、プラネットギヤを支持しているフレキシブルピンはより大きくたわんで誤差を吸収し、荷重の分配を均一にする荷重等配機能を発揮する。

#### ② 偏心荷重の場合

歯面左側端部に偏心荷重が加わった場合、フレキシブルピンは図の様にたわむため、歯面右側の受け持つ荷重が増加、歯幅方向における荷重分布の偏りが緩和される。歯車の歯筋誤差、ギヤケースの変形、ミスアライメント等の影響をも吸収・軽減することができる。

### 3.2 大容量ガスタービン用減速機<sup>2)</sup>

大容量減速機は構造が簡単で信頼性の高い平行軸歯車変速機を採用している。ギヤケースは鋳鉄製で上下2分割形または3分割形となっている。振動・騒音の防止のため、特に剛性の高い構造となっている。伝達動力20MWは減速機としては大容量の分類となり、歯車の噛合い周速は100m/s～140m/s程度である。

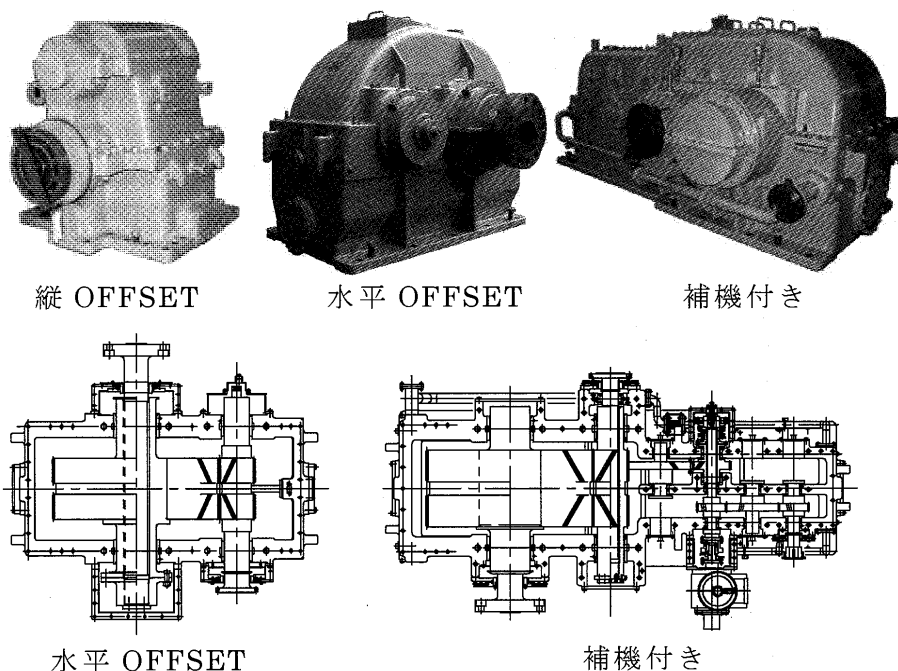


図3 ガスタービン用減速機の軸配置例

減速比は  $i = 1.6 \sim 5$  程度とし、高速歯車（ピニオン）の直径（D）と歯幅（L）の比は  $L/D = 1.5 \sim 2.0$  程度のプロポーションを採用している。大容量減速機の場合、歯車の強度を確保するため歯幅Lが大きくなる傾向があるが、L/Dは大きくとると、歯車軸のたわみで良好な歯当りを確保することが難しくなる。しかし、負荷時のたわみを考慮し歯車に適正な修整を施すことでL/Dを大きく取ることも出来る。

歯車の材質は通常クロームモリブデン鋼で浸炭焼入れ後、研削仕上げしJIS N4級の精度を確保している。潤滑油はガスタービンと共用しておりISO-VG32タービン油を使用している。

大容量ガスタービン用減速機の基本構造として、軸配置はガスタービン-発電機パッケージのコンパクト化のため、上下垂直オフセットタイプから開発・製作がスタートした。しかし現在では、容量アップに伴う製作・メンテナンス性の向上、ガスタービン起動装置等のタービン補機を減速機に接続などの高機能構造となり水平オフセットを主流としている。その他、ガスタービンや発電機との直結を容易にするためのクイル軸構造では、中空軸とクイル軸とを組立式にするなどの技術が盛り込まれている。

### 3.3 90MW減速機の概要

歯車は高速大容量の減速機に最適なやまば歯車として、歯車材質は通常選定しているクロームモリブデン鋼ではなく、材質の均質化が得やすいニッケルクローム鋼を採用した。歯車の噛合い周速は156m/sにもなり、振動・騒音が大きくなることが予想された。この対応として、ねじれ角を約26°とし、やまば歯車の片側の重な

り噛合い率5以上を確保することで静粛な運転ができる設計とした。

また、歯先のすべり速度は最大で24m/sとなる。このような高速の場合、歯面の焼き付きの一種であるスカuffing発生の懸念がある。その防止のため、当社では独自に開発した（次章参照）計算プログラムにより、小歯車歯面に最適な歯形修整を施すことでスカuffing発生を回避できるような設計とした。

軸受はすべて二つ割れのすべり軸受とした。発電機用減速機であることから、全負荷時はもちろん軽負荷時においても安定した運転ができるよう高速軸軸受には三円弧軸受を採用している。

表1に減速機的主要仕様を示す。

この減速機の上ケースを取り外した状態を図4、構造を図5に示す。

### 4. 歯車について<sup>(3)</sup>

歯車は、伝達トルクに対して十分な強度を有していること及び高速回転体として高い加工精度が必要である。

歯車のねじれ角を大きくすることで、噛合い率が大きく回転は滑らかになる。しかし、はすば歯車ではねじれ

表1 減速機的主要仕様

形式	水平偏芯の 平行軸型減速機
伝達動力	90MW
高速軸回転速度	5235 min <sup>-1</sup>
低速軸回転速度	3000 min <sup>-1</sup>
減速比	1.745

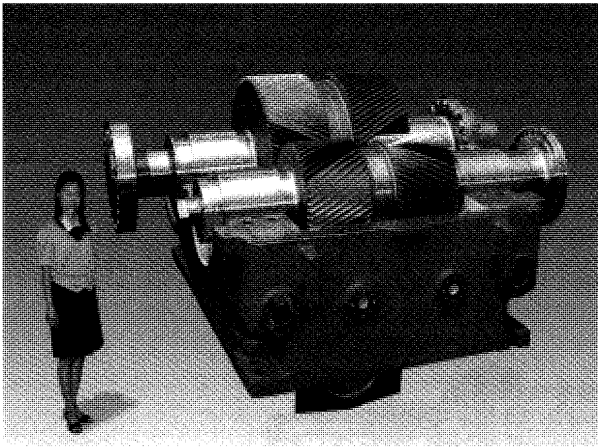


図4 90MWガスタービン発電機用減速機

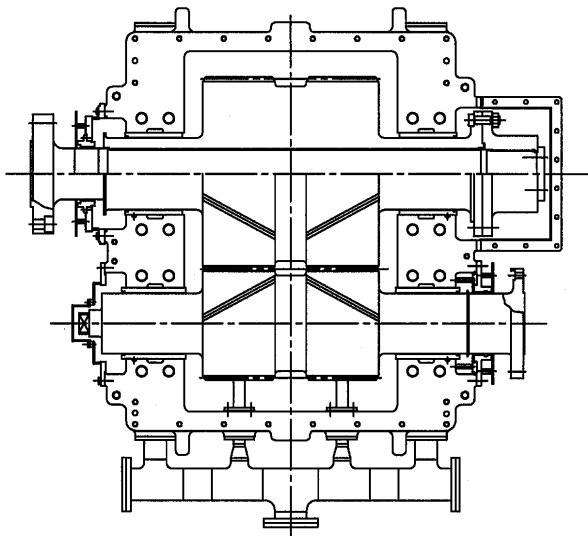


図5 90MW減速機の構造図

角を大きくするとスラスト荷重が大きくなり軸受の設計が困難になるため $10^{\circ}\sim 15^{\circ}$ のねじれ角としている。そこで、やまば歯車とすることでねじれ方向の異なる2対のはずば歯車を1軸に有し、歯車に発生するスラスト荷重を互いに打ち消し合うようにする。やまば歯車は、軸にスラスト荷重が発生しないことからスラスト軸受を省略でき、ねじれ角を $20^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 程度に大きくとり歯車噛み合い率の確保により、振動・騒音の低減を考慮した設計に適用している。

#### 4.1 歯車材料・熱処理について

歯車に必要な材料強度の要素は、磨耗を最小限に抑えるための表面硬化、曲げ荷重が作用しても折損しないよう内部の靱性を持たせることが重要となる。

そのような材料特性を引き出すため、歯面には適正な熱処理と仕上げ加工を行っている。歯車製作に使用される主な熱処理を以下に示す。

##### ① 焼入れ・焼き戻し

0.35~0.45% Cの炭素鋼あるいは特殊合金鋼に歯切り前に行う熱処理で、部材全体を同一の硬度に

することを狙って実施する。

##### ② 高周波焼入れ

焼入れしようとする歯車の近傍に誘導子というコイルを設け、コイルに高周波電流を流し、歯車表面に発生する渦電流を利用して急速に加熱し焼入れする。0.35~0.45% Cの炭素鋼あるいは特殊合金鋼に適用できる。

##### ③ 窒化

鋼の表面に窒素を浸入させ、鋼に含まれるクロム、モリブデン、アルミニウム等の合金元素の窒素化合物を生成させることにより表面に硬化層を作る方法。

したがって、鋼にはクロム、モリブデン、アルミニウム等の元素が含まれている必要がある。クロムやアルミニウム等が存在しない鋼では、窒素が浸入するだけで表面硬さの著しい向上はないが耐摩耗性及び耐疲労性が向上する。これをタフトライドと呼ぶ。

##### ④ 浸炭焼き入れ

低炭素鋼の表面に炭素を浸入させて表面層のみ炭素量を増加させ、全体を焼入れし炭素量の増加した表面のみ硬化させる方法。表面の硬さは材質、質量、形状などによって異なる。

熱処理方法や材料は、生産工場の設備や規模によって変わるが、中容量から大容量変速機は浸炭焼入れを施している歯車が多く、日立ニコの歯車変速機も同様に歯面に浸炭焼入れ処理を施し、湿式歯車研磨機で研削仕上げを施している。

#### 4.2 高速大容量歯車の設計について<sup>(4)</sup>

歯車の主な損傷形態としては、歯の折損、歯面の疲労剥離損傷“ピッチング”、歯面の焼付損傷“スカuffィング”があり、強度評価は歯の磨耗(面圧)と曲げ応力に対してバランスを考慮しながら行う。

高速大容量減速機の場合、歯の曲げ強さやピッチングよりもスカuffィングが問題になることが多いため、スカuffィング強度によって歯車の設計を行う。スカuffィングは噛み合い時の摩擦発熱による歯面の焼き付き損傷の一種であり、疲労現象ではなく限界を超えると短時間でも発生する。

そこで、スカuffィング限界は、噛み合い位置における歯面の瞬間的な到達温度をあらわしたフラッシュ温度や歯面の摩擦発熱量に基づく係数であるPVT値や接触応力と歯面のすべり速度の積PV値などを用いて評価されるが、普遍的に成立する評価方法はない。

スカuffィングは摩擦発熱による瞬間的な油膜破断現象であるので、歯面上で最も摩擦発熱量が大きき部分で発生すると考えられる。接触応力とすべり速度の積であるPV値は歯面における単位時間当りの摩擦仕事量に比例する値のため、このPV値を指標に適正な歯形修整を



検討した。(一般に大容量歯車は負荷運転時、荷重により歯がたわむため適正な歯当りが出なくなるので歯面を歯形修整し負荷運転において歯当りが適正になるようにしている。)

インポリュート歯車では、噛合いピッチ円上では転がりのみ、つまりすべりがゼロの状態であるがピッチ点以外の噛合いではすべっている。各噛合い点における両歯面の相対速度をすべり速度と呼んでいる。すべり速度は一般に噛合い周速の数分の1くらいとなる。

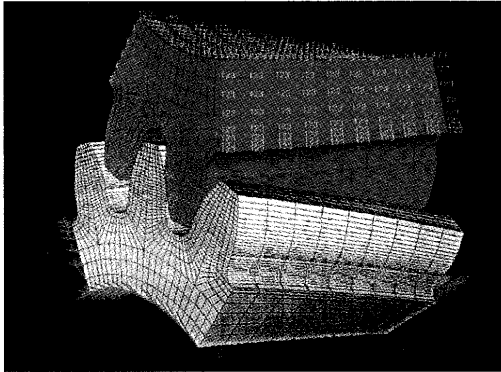


図6 歯面解析モデル

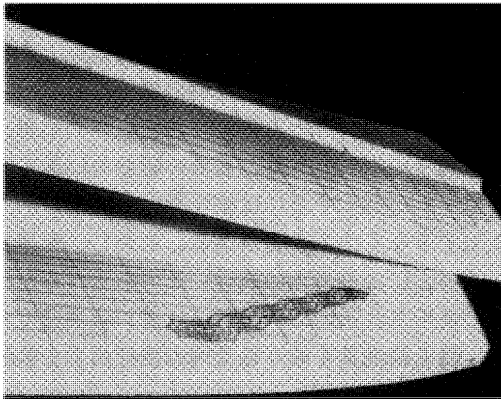


図7 歯面解析例

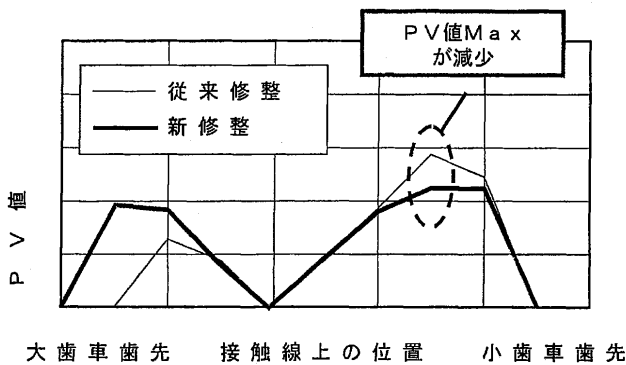


図8 PV値の変化

上述の90MW減速機の場合、歯先のすべり速度は最大で24m/sとなる。スカuffing防止のため、上記の歯のたわみ量の修整のみではなく歯面の噛合いにより発生する接触応力を解析し、PV値のピークを最小に抑えるように歯面に歯形修整を行った。(図6、図7、図8参照)

また、当社で独自に開発した“歯車接触面の油膜厚さの計算プログラム”により、負荷時の歯面間に形成される潤滑油膜厚さを解析した。

上記により“歯車接触面の油膜厚さ”及び先に述べた“負荷時の歯当り”を考慮し、高速高荷重条件においてもスカuffingの発生を回避する設計としている。

この技術は、かさ歯車の大容量化・高周速化にも応用し、ガスタービン駆動排水立形ポンプ用歯車減速機を完成させた。

### 5. 大容量変速機用軸受の特徴

一般に、転がり軸受はすべり軸受と比較して給油方法が簡素化できる、軸受損失が小さい等で有利となるが、

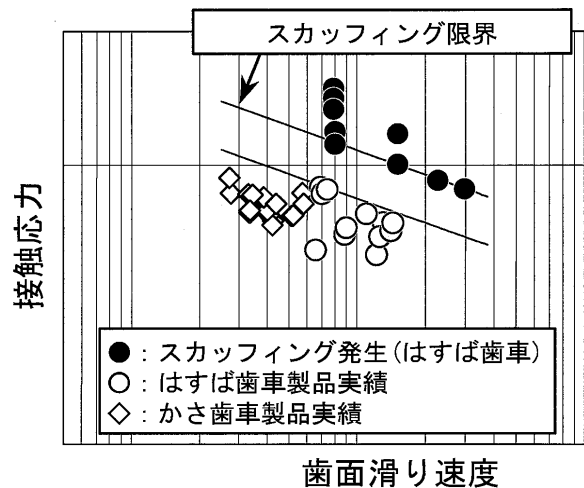


図9 PV値の評価

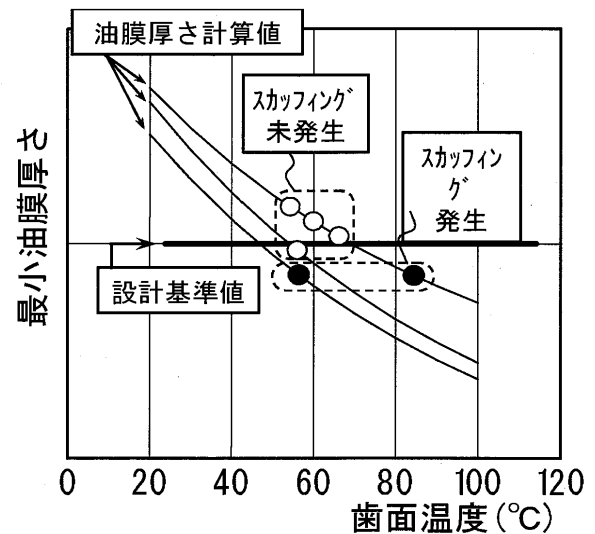


図10 油膜厚さの評価

大容量変速機の場合、高周速運転となるためすべり軸受が採用される。

歯車変速機の軸受は、他の回転機械と異なり回転体自重の他に伝達動力による歯車の噛合い反力が作用する。そのため、高面圧に耐えられる軸受が必要である。噛合い反力は負荷の大きさに比例するので、発電機用減速機のように全負荷から軽負荷まで広い範囲で運転される場合、軸受に作用する荷重は負荷によって変化する。全負荷時の面圧は2.0MPa~3.5MPaの高面圧から軽負荷（無負荷）時は0.1MPa程度の低面圧で使用される。したがって、全負荷運転にも十分な負荷容量があることはもちろんであるが、軽負荷時の軸受の面圧が低い運転状態においてもオイルホワール等による振動を抑えた安定した運転ができるような制振性のよい軸受が必要である。

そこで、高速軸（ピニオン）軸受には高速運転でも制振性が高く負荷容量の比較的大きな三円弧軸受、低速軸（ギヤ）軸受には制振性はやや劣るが許容面圧が高い真円軸受や楕円軸受を採用している。

日立ニコでは日本初の国産ガスタービンの開発に合わせ同ガスタービン用減速機を開発した。当時は周速56.5m/s面圧3.55MPa（PV値=200MPa・m/s）が開発目標であったが、現在では同ガスタービンの容量アップに従い、軸受周速90m/s面圧2.95MPa（PV値=265MPa・m/s）となり実用運転中である。

近年はオイルアンドガス用途が増加しておりAPI（API：American Petroleum Institute）等の仕様により減速機についても振動値が厳しく制限されている。

テイルテイングパッドタイプの軸受は一般に給油量や

表2 90MW減速機の歯車仕様

	ピニオン	ギヤ
歯数	51	89
モジュール	10	
K 値	21.7kg/cm <sup>2</sup>	
Qb 値	7.86kg/mm <sup>2</sup>	
噛合周速	156m/s	

表3 90MW減速機的主要軸受仕様

	ピニオン	ギヤ
軸受型式	三円弧軸受	楕円軸受
軸径	315mm	375mm
軸受長さ	315mm	280mm
周速	86.3m/s	58.9m/s
面圧	2.98MPa	3.23MPa
材質	ホワイトメタル	
潤滑油種	タービン油 ISO VG32	

熱損失がスリーブタイプの軸受より大きいものの、制振性能が高いことが知られている。そのため、減速機の高速軸に制振性能の高いテイルテイングパッドタイプの軸受採用を要求されることも多い。スリーブタイプの軸受も軸受幅や軸受すきまの他、軸受内面の円弧形状を適正に設定し制振性を保ちながら給油量の低減や効率向上を図っている。

## 6. 潤滑の特徴

潤滑油はガスタービンと共用となるが、ガスタービンの潤滑油冷却システムはエアフィンクーラを使用しているため、他の産業用途の減速機と比較すると高い温度で給油されることが特徴である。

大容量減速機の場合、熱損失量が大きいため、強制給油となるが主な給油は軸受と歯車の潤滑及び冷却である。歯車への給油は歯面を効率的に冷却するため、歯車の反噛み込み側からとしている。

## 7. 減速機の性能

大容量ガスタービン発電機用減速機に要求される性能は減速機の信頼性が高いことはもちろんであるが、高効率化である。

減速機の損失は、軸受損失、歯車の噛合い損失、回転体の風損に分けられる。

この中で、影響力の大きな損失は軸受損失である。大容量ガスタービン発電機用減速機の場合、減速機損失の約60%を軸受損失が占め、約25%が回転体の風損、残りが歯車の噛合い損失である（補機の駆動力は除く）。

軸受損失を小さくするには軸受径・軸受幅を小さくし攪拌損失を少なくする必要がある。しかし、変速機の軸受は伝達動力による歯車の噛合い反力を受けるため、高面圧下で使用されるので、実際には高い給油温度で使用する他、軸受給油量を絞る軸受内の攪拌損失を低減している。

風損は油と空気が混合しミスト状になった雰囲気中で歯車が回転することによる損失である。歯車の噛合い周速が120m/sを超えると回転体の風損の影響も大きくなり注意が必要で、風損の低減は、回転体の周りをカバーで覆い対応している。

中小容量ガスタービン発電機用減速機に採用している遊星歯車変速機は、平行軸変速機と比較し回転体を小さく出来るため、風損低減には有利である。

## 8. 今後の課題<sup>(5)</sup>

高性能な高速大容量歯車減速機のニーズは、今後益々高まるが、そのためには高効率化が重要と考える。

大容量減速機損失の60%が軸受損失であることを述べたが、軸受損失低減には軸受幅を小さくする等、更に高面圧化する必要がある。現在軸受材質として主に使用しているホワイトメタルでは耐熱性や機械的強度に限界

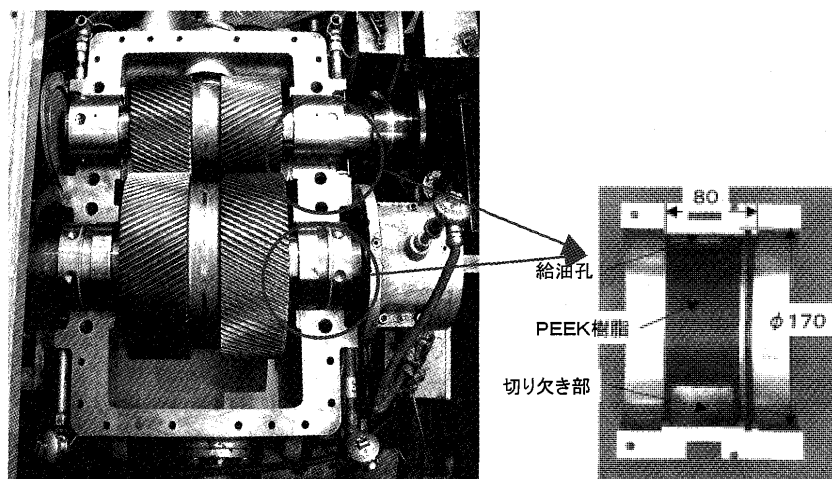


図11 樹脂軸受の減速機への組み込み例

があり、さらに高面圧・高周速等の性能向上は難しい状況にある。最近、ホワイトメタルを超える軸受材料としてPeek材などの樹脂材料が注目されている。

軸受に使用されるPeek材は、カーボンファイバ等を添加することにより、樹脂本来が持っている耐熱性・耐摩耗性に加え強度面でもホワイトメタルを超える特性を有している。社内試験データでは、周速120m/s面圧4.0MPa (PV値=480MPa・m/s) とPV値でホワイトメタルの2倍近くの性能向上が得られている。

日立ニコでは、大容量変速機にPeek樹脂軸受を採用し高周速・高面圧化により損失低減や減速機本体の小型軽量化を目指しており、社内試験用減速機等に試験的に樹脂軸受を組み込み、性能確認中である。

## 9. おわりに

ここでは、歯車変速機一般の他、大容量ガスタービン発電機用減速機を実現した方法を主体に述べた。

省エネルギーやCO<sub>2</sub>排出量の削減が叫ばれ、原動機・被動機の大容量高効率化が進む中、これらをつなぐ中間機である変速機についても高効率化が求められると考える。

また、省スペース化のための設置台数の低減、原動機

や被動機の単機大容量化から高速大容量の減速機ニーズは益々高まっている。大容量化は歯車変速機の伝達動力当りの熱損失を最小に抑えることが出来るメリットもある。

産業用に用いられる歯車変速機は、マクロに見れば歴史も古く技術的に急成長する分野ではないとの見方もあるが、高速・大容量変速機における高効率化技術は歯面・軸受の要素技術となる磨耗・摩擦等トライボロジ的な課題を克服することで大きく進歩すると考える。

今後も、信頼性の高い変速機製品の供給を通じて社会に貢献したい。

## 参考文献

- (1) 渡部富治, 木暮清, 鵜飼隆好, 片岡更一, 竹内茂, 藤原満, 戸倉郁夫, 新井隆景:「遊星歯車・差動歯車装置の設計」日刊工業新聞社
- (2) 阿部勢武夫, 村山孝夫他:日立評論Vol.58「日立ガスタービン用減速機」
- (3) 阿部勢武夫, 黒岩稔:日本機械学会誌80巻706号 (P62-P67)
- (4) 大野耕作, 田中直行:日本機械学会論文集64巻628号C編 (P291-296)
- (5) 小林博美, 福島康雄, 井上知昭:日立インダストリイ技報第2号 (P7-P10)
- (6) RC205:歯車装置に関する実用技術革新のための調査研究分科会“歯車装置の進化”(P139-P141), 日本機械学会



## 長良川の鶺鴒

山本 誠\*1  
YAMAMOTO Makoto

今年度のガスタービン定期講演会は、岐阜市の長良川国際会議場で開催されます。岐阜というと、織田信長が天下統一の第一歩として命名し、その居城である稲葉山城（現・岐阜城）があった（ある）地です。定期講演会が開かれる長良川国際会議場は、その名称が示すように、清流・長良川の河畔にあります。また、長良川といえば鶺鴒（うかい）を連想される方が多いのではないのでしょうか。ということで、今回の喫茶室では、鶺鴒について書いてみたいと思います（かなり強引ですが、汗）。

鶺鴒は、驚くことに、古事記や日本書紀に記述が見られるほど古くから行われている伝統漁法であり、1300年以上の歴史を有しています。これらの書物に記述があるということは、鶺鴒は当時としても大変珍しい漁法だったのでしょう。鶺鴒では、鶺鴒に鮎を飲み込ませて瞬間的に圧迫死させるため、鮎が傷まず鮮度が良くて美味だと言われ、江戸時代には大名や将軍への、また明治時代以降は皇室や伊勢神宮への献上品として珍重されてきました。織田信長や徳川家康も鶺鴒を厚く保護したそうです。現在、長良川の鶺鴒用具一式は国の重要有形民俗文化財に、鶺鴒漁法は岐阜市重要無形民俗文化財に指定されています。また、長良川には宮内庁式部職に任命された9人の鶺鴒匠がおり、この職は代々世襲され、鶺鴒の伝統が受け継がれています。

長良川の鶺鴒は、風折烏帽子に腰蓑という伝統的な装束を着けた鶺鴒匠が10～12羽の鶺鴒を紐で操り、小船の船首にかがり火を焚いて、その光に集まってきた鮎を鶺鴒に一旦飲み込ませ、船端で吐き出させて鮎を取るという漁法です。初夏に鮎が遡上し、秋に海へ下って行くサイクルに合わせるため、例年5月11日から10月15日までの期間に行われています。また、鮎がかがり火に集まりやすくするために、満月の夜には漁が行われません。

鶺鴒匠は、鶺鴒の首に巻かれた紐の輪を調節することにより、鶺鴒が一定以上の大きさの鮎を飲み込むことができないうようにします。一方、輪より小さい鮎は鶺鴒の胃袋に収まりますので、実に巧妙な仕掛けと言えます。鶺鴒匠と鶺鴒とのコラボレーションといったところでしょうか。中国にも昔から鶺鴒がありますが、中国の場合、鶺鴒の首に輪をはめるだけで、紐をつないで鶺鴒を操ることは行っていないので、鶺鴒を紐で操る漁法は日本独自の工夫のよう

です。

鶺鴒の主演である鶺鴒はペリカンの親戚であり、川鶺鴒と海鶺鴒に分類されます。これまでは保護鳥に指定されていたためその捕獲が制限され、現在の鶺鴒には許可を得て捕獲された海鶺鴒だけが使われています。面白いことに、長良川だけでなく日本全国12箇所ある鶺鴒に使われている鶺鴒は、すべて茨城県日立市伊師浜（いせはま）海岸で捕獲されたものだそうです。海鶺鴒は東京湾でも見られ、それほど珍しくない鳥です。伊師浜海岸の鶺鴒だけが使われるのは不思議でしたので、なぜ伊師浜海岸の鶺鴒だけが鶺鴒に使われるのかをいろいろと調べてみましたが、結局、その理由はよく分かりませんでした。なお、鶺鴒の生息数が増えすぎて漁業被害が発生し始めたため、2007年3月に保護鳥の指定が解除され、狩猟の対象になりました。鶺鴒を取り巻く環境も変化しているようです。

松尾芭蕉は、鶺鴒を見て、「おもしろうて やがて悲しき 鶺鴒舟かな」という句を詠んでいます。鶺鴒匠にこき使われ、せっかく取った獲物を横取りされる鶺鴒の気持ちになってみると、「悲しき」という言葉が共感を伴って胸に迫ってきます。また、小林一茶には、「叱られてまた這入る鶺鴒の いじらしや」という句があります。こちらは一生懸命働く鶺鴒のけなげさが伝わってきて温かい気持ちにさせられます。これらが名句として現在に伝えられているのは、いずれの句も、鶺鴒匠と鶺鴒との関係を通じて、人間社会あるいは人間心理を活写しているからだと思います。誰でも自分にとっての鶺鴒匠や鶺鴒を思い浮かべることができるでしょう。大学でいえば鶺鴒匠＝教員、鶺鴒＝学生となりますし、企業でいえば鶺鴒匠＝上司、鶺鴒＝部下です。また、これらの句に共感できるということは、江戸時代も現在も日本人の心理に大きな差異はないことを表しています。学生や部下の業績を一方的に横取りするような教員・上司は今も昔もいますし、教員・上司の命令のままに頑張るけなげな学生・部下もたくさんいます。自省も込めて、人間社会で鶺鴒匠と鶺鴒のコラボレーションにみならう点が多いのではないのでしょうか。しかし、最近、鶺鴒匠に噛み付く鶺鴒が大学や企業で現れ始めたようですが、

岐阜は、新幹線で通過するだけで、これまで実際に訪れたことがなかったため、私にとって初めての機会であり、今回の岐阜訪問を楽しみにしています。また、可能であれば、観光船に乗って鶺鴒を見物したいと思っています。

原稿受付 2007年8月13日

\*1 東京理科大学 工学部 機械工学科

〒102-0073 東京都千代田区九段北1-14-6

# 2007年第52回ASME国際ガスタービン会議

## 1. 全 般

武石賢一郎\*1  
TAKEISHI Kenichiro

ASME TURBO EXPO 2007は、カナダのケベック州モントリオールの国際会議場において、5月14日(月)から17日(木)の4日間に亘り開催された。図1に示す国際会議場は、高層ビル群の新しい町と、旧都市の丁度境界に位置し、内部は赤や青の壁あるいは緑やピンク、黄色の色ガラスなどが使われたフランス系らしいモダンな作りであった。

技術セッションへの参加人数は約3000人、発表論文数762件、参加国数54カ国、展示のブース数125であった。前回のバルセロナで開催された第51回ASME国際ガスタービン会議が、登録料が高い割には参加者へのサービスが悪いと不評であったが、そのことが事務方に伝わったのか今回はかなり改善された。技術セッションは午前8:00-12:15、午後14:30-17:00とバルセロナの開催の形態より1時間早く終了した分、パラレルに開催されるセッション数が多くなった。

初日の14日(月)の8:30-9:30にかけて、2007年のScholar賞を授賞されたMITのE. M. Greitzer教授が“Some Aerodynamic Problem of Aircraft Engines: Fifty Years After”と題した特別講演(Paper No. GT2007-28364)をされ、2度目の賞を受賞された。Greitzer教授の授賞式の状況を図2に示す。

基調講演は、初日の午後12:00-15:00にかけて、特別講演と同じホールで聴衆全員が昼食を取りながら3名の講演者の講演を聴くという初めてのスタイルで実施された。基調講演者は、全体を“Developing the Next Generation of Global Gas Turbine Engineers”と題して、Pratt & Whitney CanadaのJ. Saabas 博士、GE Aircraft EnginesのD. C. Whisler博士、Alstom社のC. Soothill副社長の3人が講演された。技術セッションに参加した約1600人が、一堂に会して聞き入った会場の様子を図3に示す。

17の技術委員会で受けたアブストラクトの総数は1325件、論文のドラフトが提出された総数は884件であった。最終的に査読を通過した論文の総数は762件で、217のセッションで発表された。発表が認められた論文762件の分野を表1に示す。例年通りターボ機械が172件で1位である。この傾向は日本で開催される国際会議(IGTC)と同じである。2位は伝熱の125件で、日本では燃焼・燃料が2位を占めることが多く、日本のIGTCでは伝熱



図1 ASME TURBO EXPO 2007が開催された国際会議場



図2 IGTI2007のScholar賞に選ばれScholarLectureをされた後授賞されるGreitzer教授



図3 3人の基調講演を、昼食を取りながら傾聴する参加者の状況

原稿受付 2007年8月8日

\*1 大阪大学大学院工学研究科 機械工学専攻  
〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1

は3～4位と異なる。ASME国際ガスタービン会議の特徴は、ターボ機械に関連した伝熱の論文が多いことを示しており、一方日本ではターボ機械に関連する研究が少ないか論文発表されないことを意味している。構造関係は100編と3位であり、このあたりから企業および企業—大学の連携が欧米では進んでいることが伺える。筆頭著者の所属別では、大学が46%、企業が30%、官が7%（残りは大学院生）である。技術セッションの状況を図4に示す。

展示の項目で詳細報告されると考えられるが、図5に示すMRC所属のBell412型ヘリコプター実機が展示場の一角に展示され、エンジン部を見ることが出来ると共に、コックピットへの試乗も許されたため、コックピットに座ってカメラに収まるなど、多くの方が関心を寄せていた。本ヘリコプターは飛来して閉鎖した道路に着陸して搬入したとお聞きしたが、ASME TURBO EXPO 2007の企画の努力が見える楽しいイベントであった。

最終日の17日(木)の午後14:30～展示場で閉会式が行われた。技術セッションは同日の午後17:00まで行われ、2008年ベルリンでまた会いましょうを合い言葉に和やかに終了した。

800件近い論文を4日間に亘り同時並行に進行するセッションで討議することで、聴講したい論文が重なる状態が増えていた。これに対処してか、ASME TURBO EXPO 2008はドイツの首都ベルリンで2008年6月9日(月)から13日(金)の5日間に亘り開催されることとなった。ASMEはさらに参加者に魅力あるサービスを企画するのではないかと期待する次第である。



図4 技術セッションの状況

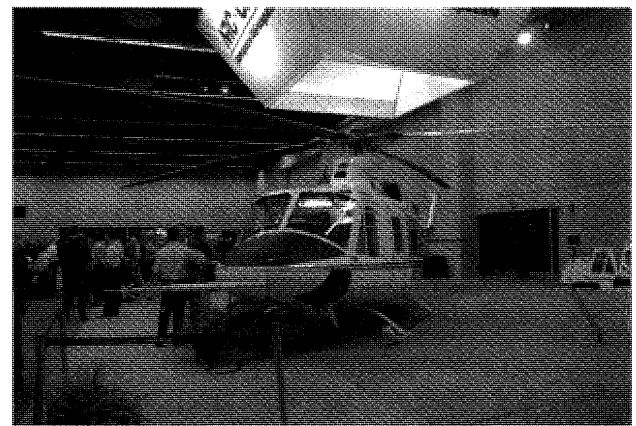


図5 MRC所属のBell412型ヘリコプター実機の展示

表1 ASME TURBO EXPO 2007発表論文

委員会名	論文数	セッション数
Aircraft Engine	24	8
Ceramics	14	3
Coal, Biomass and Alternative Fuels	15	4
Combustion and Fuels	89	21
Controls, Diagnostics and Instrumentation	42	13
Cycle Innovations	46	12
Education	8	3
Electric Power	19	7
Environmental & Regulatory Affairs	4	1
Heat Transfer	125	30
Industrial and Cogeneration	24	10
Manufacturing Materials & Metallurgy	23	12
Marine	11	4
Microturbines and Small Turbomachinery	29	7
Oil & Gas Applications	16	13
Structures and Dynamics	100	26
Turbomachinery	172	43
合計 (17 Committee)	762	217

## 2. 航空用ガスタービン

佐藤 篤\*1  
SATO Atsushi

キーワード：プロダクト・ライフサイクル・マネジメント，シミュレーション，航空機用エンジンの試験，アイシング

### 1. 概要

今年の航空エンジン委員会主催のセッションは計8セッション，34講演で，昨年の10セッション，44講演（共催含む）より少ない。このところ航空エンジン委員会主催のセッション数は減少傾向にある。

内容は，プロダクト・ライフサイクル・マネジメント，エンジンモデルとシミュレーション，航空機用エンジンの試験などに関する論文講演と，高精度シミュレーション技術，アイシングに関するパネルセッションであり，残念ながら，VAATEなどの大型開発プロジェクトに関する講演はなかった。

### 2. プロダクト・ライフサイクル・マネジメント

これは今回の会議で初めて取り上げられたテーマだが，論文講演が2セッション設けられた。一つは最適化設計（GT-27799）や設計プロセスの自動化・効率化（GT-27966・27555）などに関する発表があり，もう一つは，設計初期段階での部品コスト見積り（GT-27485）や革新的な設計プロセス（GT-27798）などの発表があった。後者は，いずれも大学による論文発表である。これらは，企業が独自で進めがちな内容だが，企業がスポンサとなり，大学が研究テーマとして取組んでいる。

### 3. エンジンモデルとシミュレーション

このテーマも論文講演が2セッション設けられ，エンジン始動時の性能予測（GT-27193），インレット・ディストーションによる圧縮機要素への影響（GT-27033），ヘリコプタ用 I R 排出量低減デバイス（GT-27408），Prognosis and Health Management（PHM）の枠組み（GT-27953）などが発表された。このPHMの枠組みとは，①寿命予測，②状態認知，③情報管理の3つの機能ブロックから構成されるもので，将来，軍用の分野を中心にさらに適用を拡大していく考えが示された。

### 4. 航空機用エンジンの試験

5件の論文のうち3件は米空軍アーノルド技術開発センター（AECD）関係者によるもの，または共著であり，こ

の分野におけるAECDの存在感を物語っている。この中に，テストセルにおいてインレット・ディストーションを過渡でコントロールできるデバイスに関する発表がある（GT-27222）。このデバイスは，最新の高機動型戦闘機や垂直／短距離離着陸機におけるエンジン入口の急激な流れ場の変動に対するエンジンの動特性を評価する試験を行う際に使用するものである。その他，AECDの歴史，主な設備の仕様，今後の取組み（GT-28088）などに関する論文発表があった。

### 5. 高精度シミュレーション技術

官・産・学を代表して国防省，GE，ケンブリッジ大学から出席者が選ばれ，現実に忠実な3Dバーチャル・シミュレーションの実現について，それぞれの分野から最新の事例が示された上で議論がなされた。国防省からは，飛行中にミサイルをリリースする際の試験とシミュレーションの比較事例などが示され，聴衆の関心を得ていた。また，様々な解析（CFD～FEA）があり，さらに同じ目的でも異なるツールが複数ある中，新しいツールを開発する際は，既存ツールとの互換性の確保や統一化を図る必要があるとコメントされた。

### 6. アイシング（氷結）

このパネルセッションでは，「Ice Crystal」によるアイシングがエンジンに与える影響について紹介・議論された。これによると，産官学共同で「Engine Harmonization Working Group」というワーキング・グループ（WG）を作り，アイシングの原理解明等に取り組んでいるとのこと。このWGの任務は主に，①大気の計測，②粒径・密度・範囲の把握，③accretion（着氷・成長）／shedding（剥がれ落ちること）の原理解明，④試験方法と試験設備の検討の4つ。原理解明のための実験は難しく，また世界的に設備が不足していることから産官学の共同体制を採り，効率的に調査を進めている。

### 7. その他

航空エンジンの全般に関する論文講演が設けられ，空中発射型ミサイルの推進力として研究されているガス・ジェネレータに固体ロケットを用いたエア・ターボ・ロケット（GT-27826・27844），高バイパス比エンジンのコアカウル内ベンチレーションに関する基礎研究（GT-28048）などに関する論文が発表された。

原稿受付 2007年7月3日

\*1 (株)IHI 航空宇宙事業本部  
防衛システム事業部 F7プロジェクト部  
〒188-8555 東京都西東京市向台町3-5-1

### 3. 産業用ガスタービン

伊藤 栄作\*1  
ITO Eisaku

産業用ガスタービンに関連したCommitteeが例年と同じ分類で5つ設けられた。以下にそれぞれの概要を示す。

#### 1. Cycle Innovations : 新規サイクル

12セッション46件の論文発表があった。このうち新しいサイクル検討に関するものが18件と最も多い。このうち、Humid Cyclesとして5件あり注目に値する。

また、CO<sub>2</sub>低減関連トピックが急増しセッションが3つ設けられ、論文が10件発表され関心の高さが伺えた。グローバルなトピックであり、法規制の影響も含めて今後の見通しはどうかという観点で意見交換が多くなされた。今後の動向が注目される。

将来の燃料電池関連サイクルも3セッション9件、Cycle Optimizationも9件であった。サイクル改良や新しいコンセプトなど、将来に向けた検討が引き続き多くなされており、ガスタービン技術の応用の広さと展開の可能性を改めて感じた。

#### 2. Electric Power : 電力事業用ガスタービン

7セッション19件の論文発表があった。5つのCommitteeの中で唯一大幅に数が増えた(去年は12件)。

将来機種の情報が得られるAdvanced GT Systems and Developmentが人を多く集めた。米国と日本から国プロによる技術開発状況が紹介された。米国から、DOEプロジェクトを中心に水素焼きガスタービン、IGCC、CO<sub>2</sub>キャプチャーが発表され、日本から1700℃級の要素技術開発が紹介された。その他、現在のユーティリティの主力機種の運用状況や、燃料多様化、ボトムリングサイクルの改良など広い範囲の発表があった。

また、パネルセッションは、各メーカーから開発中の新機種に関する発表があり、大型GTメーカー3社、航空転用型に関して2社の紹介があり、立見ができるほどの聴衆であった。その他、米国のFutureGenなど、化石燃焼に対するゼロエミッション技術に関するセッションと、CO<sub>2</sub>圧縮に関するセッションの2つが設けられ、環境問題が取り上げられた。

#### 3. Industrial & Cogeneration : 産業&コジェネ用GT

10セッション25件の論文発表があった。

HRSGのモデリングに関するものが3件、吸気冷却に関するものが4件、吸気フィルタ関連が2件、性能やサイクルのモデリングに関するものが5件、運用やメンテナンスに関するものが4件と幅広い内容であった。ボトムリングサイクルや補機などガスタービン本体以外の技術分野の発表が多い。

#### 4. Oil and Gas Applications : 石油、ガス用GT

13セッション16件の論文発表があった。内容は、ガス圧縮の性能計測、LNGパイプライン用圧縮機などが多い中、小型のガスタービンの開発や主要要素の開発も発表された。パネルディスカッションは、各メーカーから主力機種とそのアップグレードに関するセッションと、メンテナンスとモニタリングのセッション、寒冷地用パイプライン用圧縮機の運用、Subsea Compressionなどが設けられた。Oil&Gasの分野は、ユーザーと運用を意識した内容が多いのがこのCommitteeの特徴である。

#### 5. Marine : 船用ガスタービン

4セッション11件の論文発表があった。軍用としての用途が圧倒的に多く、米英の海軍への適用例、運用マネジメント、補機、モニタリングなどのほかに新機種の開発状況も発表された。数は多くは無いが毎年安定して新開発から運用まで幅広い内容の発表がある。

以上5つのCommitteeの概要を記したが、このうち1~3に分類された論文や発表の中には、本来明確に分類することが難しいものも多いので、広く目を通すことが必要である。

また、CO<sub>2</sub>低減関連のトピックや、IGCC関連のトピックは、Committeeをまたがって発表されたり、複数の論文に分割されている。環境問題と燃料の多様化などの市場の変化に伴い、従来の分類を見直すべき時期に来ているかもしれないと感じた。

原稿受付 2007年8月8日

\*1 三菱重工業(株) 高砂研究所

〒676-8686 兵庫県高砂市荒井町新浜2-1-1



## 4. 小型ガスタービンおよびセラミックス

岸川 忠彦\*1

KISHIKAWA Tadahiko

キーワード：マイクロタービン，熱交換器，バイオマス，セラミックス，CMC，EBC，TBC

小型ガスタービン(以下MGT)及びセラミックスの両分野の合計でセッション数10(15)，論文数43(46)であった(括弧内は昨年の数値を示す)。詳細はMGTでセッション数が7(11)ならびに論文数が29(38)件，セラミックスはそれぞれ3(4)ならびに14(8)件である。論文数はMGTで減少，セラミックスで増加となっている。

MGTは分散エネルギーシステムの重要な要素であるため意欲的に研究開発が進められており，また，現場での運転実績も出揃ってきている。したがって，発表内容も基礎研究から保守点検にわたる広範な分野にまたがっている。

パッケージ関連で，日本の法律・規格に適合したパッケージの設計・検証試験について(GT-27697)，更にそのパッケージに適用の遠隔監視システムによる故障検知と故障診断・予知保全の実践状況(GT-27355)，65kW級MGTと排熱回収モジュールを組み合わせたパッケージ(GT-28294)，MGTの効率・出力向上を図るべくWAC\*とHAT\*を適用した150kW級MGTプロト機による試験(GT-28192)などが報告された。

低温排熱を利用する発電装置の作動媒体の選定や逆解法設計のタービン性能(GT-27749)や，100kW級MGTのCCHP\*運用による経済性検討(GT-27883)，補助電源ユニットの性能解析(GT-28037)も報告された。

バイオマス関連では，外燃型MGTを用いたCHP\*システムで部分負荷でのバイパスフローの影響を分析し経済的に最適な制御法を検討した(GT-28264)，木材ペレットを燃料とした外燃型MGT燃焼器の熱交換システムを解析した(GT-28076)等が報告された。また，下水消化ガスをMGTの燃料として適用する手法と実機での運転実績が紹介された(GT-27351)。

遠心圧縮機・燃焼器・タービンを同一ディスク上に配置した50kW級MGTの試作試験(GT-28095)，模型用ジェットエンジンのノズルとローターを各々セラミック及びインコネルで製作して種々の組み合わせで運転し性能を考察した(GT-27630)等が報告された。クライオ

クーラー用の小型高速永久磁石モーターの設計製作と試験(GT-28279)，フォイル軸受を採用した高速永久磁石モーター駆動の100HP級高速ブロワーの設計・試験(GT-27828)が報告された。

燃焼・高温腐食関係では，過濃燃焼-急希釈-希薄燃焼-燃焼器(RQL combustor)で経験した高温腐食の状況と対策(GT-27362)，ダクトバーナーを70kW級MGTの排気に設置した試験(GT-28350)の報告があった。

ターボチャージャ関連で，小型圧縮機の性能測定(GT-27558)，熱的境界条件が半径流タービンの温度分布に及ぼす影響の数値解析(GT-27835)が報告された。また，100kW級MGT用半径流タービンの性能測定と数値解析結果が紹介された(GT-27707)。

熱交換器では，排気ガス中の水蒸気に起因した腐食に対する耐久性向上が重要課題であり，プライマリサーフェス式再生器(PSR)の伝熱面材料であるAL20-25+ Nb, Alloy625を模擬及び実環境下試験で評価(GT-27949)，従来材のSUS347のPSRを搭載した60kW級MGTをガス温度600℃以上の環境で運転し腐食の進行状態を観察した(GT-27190)，650℃から700℃のガスの場合はアルミナ皮膜オーステナイト系合金が有望(GT-27916)等の報告があった。設計関連では，開発したCFDコードによりスパイラル式PSRの伝熱面形状に改良を加えた(GT-27575)，セラミック製のオフセットストリップフィン付熱交換器の最適化計算(GT-27888)，再生器設計に遺伝的アルゴリズムを用いて多目的最適化した(GT-27763)等の報告があった。また，伝熱面に半球状ディンプルを設けたスパイラル式PSRの試作・試験(GT-27209)，再生器コアの溶接組立方法(GT-27884)も報告された。蓄熱式熱交換器について，設計計算を集中定数系ではなく複数に分割しておこなう提案(GT-27215)や，排熱に加えて太陽熱も回収し300kW級のMGTを駆動するシステムの検討(GT-27216)等の発表があった。

セラミックス関係は，寿命予測と材料評価，CMC，EBC及びTBCが話題であった。機械的熱的負荷変動下におけるセラミック材の寿命予測法(GT-27047)，モノシリック構造セラミックの信頼度予測法(GT-27935)，CMC材料の状態変化に基づいた寿命予測手法(GT-28167)，逐次破壊解析法を適用したCMC材(N720/A)部材の寿命予測(GT-28332)，CMC部品の信頼性・クリープ/疲労解析(GT-28225)，EBC/CMCの燃焼器外筒の熱劣化損傷解析(GT-27929)等が報告された。モ

原稿受付 2007年8月23日

\*1 (株)荏原製作所 風水力機械カンパニー

〒299-0296 千葉県袖ヶ浦市中袖2-0-1

※ WAC (Water Atomizing Inlet Air Cooling)

HAT (Humid Air Turbine)

CCHP (Combined Cooling, Heating and Power production)

CHP (Combined Heat and Power production)

ノリシック窒化ケイ素EBCに対するボンドコートシステムの開発 (GT-27685), TBCの非破壊評価にフーリエ領域光コヒーレンス・トモグラフィと光励起発光圧電分光学とを組み合わせる手法の検討 (GT-27557), TBC材に希土類元素を添加して蛍光特性からTBC厚さを計測する光学的非破壊状態監視 (GT-28114), 要求通りの特性を持つ微細構造のYSZを形成する為の熱処

理温度制御のガイドライン (GT-28147) 等が発表されている。圧力比3~30で使用されるセラミック部品の長期劣化による破断曲線 (GT-27956), CMCの層間き裂の進展に対する抵抗の評価 (GT-27080), Melt-infiltration法で作るSiC/SiC複合材の引張クリープ特性 (GT-27491), 燃焼器外筒に適用したFGI-CMCハイブリッド材 (GT-27532) が発表された。

## 5. ターボ機械の性能と流れ

### 5.1 軸流関係

山田 和豊\*<sup>1</sup>

YAMADA Kazutoyo

#### 5.1.1 全般

軸流ファン・圧縮機では9セッションで35件, 軸流タービンでは10セッションで42件の講演があった。軸流関係の総論文数は77編であった。国別内訳としては、米国が16編と最も多く、次いで英国が15編, 独国が10編, 中国が9編と続いている。中国については、軸流ファン・圧縮機だけで7編あった。日本は5編であった。

#### 5.1.2 軸流ファン・圧縮機

軸流ファン・圧縮機のセッションは、設計関係, 失速関係, チップクリアランス関係, 性能改善, 損失メカニズムに分かれる。論文数は、設計関係が最も多く12編, 失速関係とクリアランス関係がそれぞれ8編であった。

設計関係では、従来の設計手法では得られない新しい設計概念が探求されており、逆問題解法 (GT-27486, GT-27817) や最適化を用いた設計例の紹介が多い。多目的最適化手法を用いたハブコンタリングの設計 (GT-27268) やニューラルネットワークを用いた二次元翼の最適化 (GT-28204) などが報告された。また、奇抜な非単調キャンパーラインを有する翼が数値計算によって調査され、衝撃波が弱まる結果、設計点効率および失速マージンが改善されることが示された (GT-27994)。クリアランス関係では、ケーシングトリートメントについて調べられたものが多く (GT-27365, GT-27582), 設計効率1.4%の低下で失速マージンが50%改善された報告があった (GT-27581)。また、失速との関係を調べる上で、クリアランスの大きさを変えた調査 (GT-27725, GT-28273) や非軸対称すき間および動翼ホワールに関する調査 (GT-28278) がなされていた。失速関

係では、新たに定義されたブロッケージパラメータ $b$ の輸送方程式およびそれを含む運動方程式を解く簡易的な失速のシミュレーション方法 (GT-27378) が提案される一方で、6700万点の格子を用いてNASA Stage 35の全流路解析が実施され、失速初生から失速後について詳細に調査された報告 (GT-27926) があった。他に、失速初生について入口流速の半径分布の効果 (GT-27181) やスタック角の効果 (GT-27738) を実験的に調べた報告, 失速マージンに及ぼす気体の特性を調べた報告 (GT-28068) があった。

#### 5.1.3 軸流タービン

軸流タービンのセッションは、非定常流れ (翼列干渉) 関係, チップクリアランス関係, 二次流れ (エンドウォールコンタリング) 関係など10セッションに分かれた。

チップクリアランス関係では、ケーシングからの冷却空気吹き出しによるシュラウド漏れ流れの制御 (GT-27269) やシュラウド漏れ損失を見積もるための解析モデルの提案 (GT-27786) があった。また、漏れ流れ損失を低減する試みとして、ウイングレットやスキューラなど様々なシュラウド形状について調査されていた (GT27303, GT-27623, GT-27915)。シュラウドおよびキャビティ形状に関係するパラメータについてCFDを用いて調査し (GT-27769), その結果に基づいて修正されたシュラウドキャビティの出口形状について実験およびCFDで検証した報告があった (GT-27770)。漏れ流れ関係に次いで多いのは二次流れ制御関係であった。その中でもエンドウォールコンタリングについて調べられたものが多く、最適化およびCFDを用いたコンタリング (GT-28210) や二つの形状パラメータから決定される簡単な非軸対称コンタリングの手法 (GT-28159) などが紹介された。非定常流れ関係では、空力性能に

原稿受付 2007年7月13日

\* 1 岩手大学工学部機械工学科

〒020-8551 岩手県盛岡市上田4丁目3-5

ノリシック窒化ケイ素EBCに対するボンドコートシステムの開発 (GT-27685), TBCの非破壊評価にフーリエ領域光コヒーレンス・トモグラフィと光励起発光圧電分光学とを組み合わせる手法の検討 (GT-27557), TBC材に希土類元素を添加して蛍光特性からTBC厚さを計測する光学的非破壊状態監視 (GT-28114), 要求通りの特性を持つ微細構造のYSZを形成する為の熱処

理温度制御のガイドライン (GT-28147) 等が発表されている。圧力比3~30で使用されるセラミック部品の長期劣化による破断曲線 (GT-27956), CMCの層間き裂の進展に対する抵抗の評価 (GT-27080), Melt-infiltration法で作るSiC/SiC複合材の引張クリープ特性 (GT-27491), 燃焼器外筒に適用したFGI-CMCハイブリッド材 (GT-27532) が発表された。

## 5. ターボ機械の性能と流れ

### 5.1 軸流関係

山田 和豊\*<sup>1</sup>

YAMADA Kazutoyo

#### 5.1.1 全般

軸流ファン・圧縮機では9セッションで35件, 軸流タービンでは10セッションで42件の講演があった。軸流関係の総論文数は77編であった。国別内訳としては、米国が16編と最も多く、次いで英国が15編, 独国が10編, 中国が9編と続いている。中国については、軸流ファン・圧縮機だけで7編あった。日本は5編であった。

#### 5.1.2 軸流ファン・圧縮機

軸流ファン・圧縮機のセッションは、設計関係, 失速関係, チップクリアランス関係, 性能改善, 損失メカニズムに分かれる。論文数は、設計関係が最も多く12編, 失速関係とクリアランス関係がそれぞれ8編であった。

設計関係では、従来の設計手法では得られない新しい設計概念が探求されており、逆問題解法 (GT-27486, GT-27817) や最適化を用いた設計例の紹介が多い。多目的最適化手法を用いたハブコンタリングの設計 (GT-27268) やニューラルネットワークを用いた二次元翼の最適化 (GT-28204) などが報告された。また、奇抜な非単調キャンパーラインを有する翼が数値計算によって調査され、衝撃波が弱まる結果、設計点効率および失速マージンが改善されることが示された (GT-27994)。クリアランス関係では、ケーシングトリートメントについて調べられたものが多く (GT-27365, GT-27582), 設計効率1.4%の低下で失速マージンが50%改善された報告があった (GT-27581)。また、失速との関係を調べる上で、クリアランスの大きさを変えた調査 (GT-27725, GT-28273) や非軸対称すき間および動翼ホワールに関する調査 (GT-28278) がなされていた。失速関

係では、新たに定義されたブロッケージパラメータbの輸送方程式およびそれを含む運動方程式を解く簡易的な失速のシミュレーション方法 (GT-27378) が提案される一方で、6700万点の格子を用いてNASA Stage 35の全流路解析が実施され、失速初生から失速後について詳細に調査された報告 (GT-27926) があった。他に、失速初生について入口流速の半径分布の効果 (GT-27181) やスタック角の効果 (GT-27738) を実験的に調べた報告, 失速マージンに及ぼす気体の特性を調べた報告 (GT-28068) があった。

#### 5.1.3 軸流タービン

軸流タービンのセッションは、非定常流れ (翼列干渉) 関係, チップクリアランス関係, 二次流れ (エンドウォールコンタリング) 関係など10セッションに分かれた。

チップクリアランス関係では、ケーシングからの冷却空気吹き出しによるシュラウド漏れ流れの制御 (GT-27269) やシュラウド漏れ損失を見積もるための解析モデルの提案 (GT-27786) があった。また、漏れ流れ損失を低減する試みとして、ウイングレットやスキューラなど様々なシュラウド形状について調査されていた (GT27303, GT-27623, GT-27915)。シュラウドおよびキャビティ形状に関するパラメータについてCFDを用いて調査し (GT-27769), その結果に基づいて修正されたシュラウドキャビティの出口形状について実験およびCFDで検証した報告があった (GT-27770)。漏れ流れ関係に次いで多いのは二次流れ制御関係であった。その中でもエンドウォールコンタリングについて調べられたものが多く、最適化およびCFDを用いたコンタリング (GT-28210) や二つの形状パラメータから決定される簡単な非軸対称コンタリングの手法 (GT-28159) などが紹介された。非定常流れ関係では、空力性能に

原稿受付 2007年7月13日

\* 1 岩手大学工学部機械工学科

〒020-8551 岩手県盛岡市上田4丁目3-5

関して、動静翼間距離の効果 (GT-27670, GT-27185) やクロッキングの効果 (GT-27639, GT-27848) などの調査結果が報告された。その他に、過渡試験装置を用い

た短時間試験によって伝熱と粘性損失によるエントロピー変化を分離する方法が紹介され、その方法で断熱効率を求めた結果が報告された (GT-27142, GT-27143)。

## 5.2 遠心関係

玉木 秀明\*1  
TAMAKI Hideaki

遠心関係では5セッション、21件 (論文数は22編) の発表が行われた。昨年の13編と比べ論文数が大幅に増えた。CFDを研究開発の基盤ツールとした発表が多数を占めている。インペラと羽根付きディフューザまたはタービンノズルをミキシングプレーンなどの平均化手法を用いて一体解析する手法が定着している。一方、一次元性能予測手法の改善、実験結果をベースにした現象解明や設計情報の取得などの研究も地道に進められている。

遠心圧縮機は小型化による高比速度化と高圧化が進められており、入口相対マッハ数に関わる研究や、圧力比4~11レベルの圧縮機を題材とした研究が発表された。

基礎研究のセッションでは、すべり係数予測法の改善 (GT-27064, GT-27199)、 $\mu$ ガスタービン用インペラ内の流れ場を理解するため回転流路内の低レイノズル数流れをPIVで調べたもの (GT-27471)、羽根無しディフューザを有する遠心圧縮機の基本性能に関する実験的報告 (GT-27566)、CFDの解析結果を無次元ヘリシティ、限界流線を用いて可視化し、インペラ内部の渦構造と損失のメカニズムを詳細に調べた報告 (GT-27791) がされた。

遠心圧縮機の設計に関するセッションでは、インペラ出口流れの一様化による性能向上を目指した圧力比6レベルの遠心圧縮機の開発 (GT-27100)、RWTH Aachen Universityの試験データを用いた汎用CFDコー

ドの検証 (GT-27276)、設計圧力比11のヘリコプタ用遠心圧縮機のインデューサブリードがインペラ内部流れに及ぼす影響をLDV, CFDによって調べたもの (GT-27964)、羽根無しディフューザの形状と圧縮機の作動域について簡易解析で説明を試みた報告 (GT-28300) があった。羽根付きディフューザのセッションでは、RWTHの遠心圧縮機を定常および非定常解析し、非定常性が遠心圧縮機に及ぼす影響を調べたもの (GT-27384)、小ソリディティディフューザの最適ソリディティをCFDで探索したもの (GT-27260)、非定常CFDをPIV計測結果で検証し、流れの特徴を解説したものが (GT-27200) 報告がされた。

プロセス圧縮機のセッションでは、インペラ入口相対マッハ数を評価する上での留意点 (GT-27864)、入口予旋回を持つLNG用遠心圧縮機の開発 (GT-27202)、磁気軸受によってインペラを軸方向に移動させクリアランスと圧縮機性能の関係を調べたもの (GT-282000)、入口羽根角およびソリディティをスパン方向に変えた3次元ディフューザの有効性をCFDで調べたもの (GT-27920) が報告された。ラジアルタービンのセッションでは1次元性能予測法の改良 (GT-27057, GT-27722)、実験とCFDで斜流インペラに設けられたスキヤロップのタービン性能への影響を解析したもの (GT-27330)、クリアランス流れをCFDで解析し、Scraping流れと漏れ流れのバランスとインペラ周速、圧力比などとの関係を分析したもの (GT-27807)、脈動流下での可変ノズル付斜流タービンの性能を実験的に調べたもの (GT-28323) が報告された。

原稿受付 2007年7月4日

\*1 ㈱IHI 回転流体機械開発部

〒235-8501 横浜市磯子区新中原1番地

関して、動静翼間距離の効果 (GT-27670, GT-27185) やクロッキングの効果 (GT-27639, GT-27848) などの調査結果が報告された。その他に、過渡試験装置を用い

た短時間試験によって伝熱と粘性損失によるエントロピー変化を分離する方法が紹介され、その方法で断熱効率を求めた結果が報告された (GT-27142, GT-27143)。

## 5.2 遠心関係

玉木 秀明\*1  
TAMAKI Hideaki

遠心関係では5セッション、21件 (論文数は22編) の発表が行われた。昨年の13編と比べ論文数が大幅に増えた。CFDを研究開発の基盤ツールとした発表が多数を占めている。インペラと羽根付きディフューザまたはタービンノズルをミキシングプレーンなどの平均化手法を用いて一体解析する手法が定着している。一方、一次元性能予測手法の改善、実験結果をベースにした現象解明や設計情報の取得などの研究も地道に進められている。

遠心圧縮機は小型化による高比速度化と高圧化が進められており、入口相対マッハ数に関わる研究や、圧力比4~11レベルの圧縮機を題材とした研究が発表された。

基礎研究のセッションでは、すべり係数予測法の改善 (GT-27064, GT-27199)、 $\mu$ ガスタービン用インペラ内の流れ場を理解するため回転流路内の低レイノズル数流れをPIVで調べたもの (GT-27471)、羽根無しディフューザを有する遠心圧縮機の基本性能に関する実験的報告 (GT-27566)、CFDの解析結果を無次元ヘリシティ、限界流線を用いて可視化し、インペラ内部の渦構造と損失のメカニズムを詳細に調べた報告 (GT-27791) がされた。

遠心圧縮機的设计に関するセッションでは、インペラ出口流れの一様化による性能向上を目指した圧力比6レベルの遠心圧縮機の開発 (GT-27100)、RWTH Aachen Universityの試験データを用いた汎用CFDコー

ドの検証 (GT-27276)、設計圧力比11のヘリコプタ用遠心圧縮機のインデューサブリードがインペラ内部流れに及ぼす影響をLDV, CFDによって調べたもの (GT-27964)、羽根無しディフューザの形状と圧縮機の作動域について簡易解析で説明を試みた報告 (GT-28300) があった。羽根付きディフューザのセッションでは、RWTHの遠心圧縮機を定常および非定常解析し、非定常性が遠心圧縮機に及ぼす影響を調べたもの (GT-27384)、小ソリディティディフューザの最適ソリディティをCFDで探索したもの (GT-27260)、非定常CFDをPIV計測結果で検証し、流れの特徴を解説したものが (GT-27200) 報告がされた。

プロセス圧縮機のセッションでは、インペラ入口相対マッハ数を評価する上での留意点 (GT-27864)、入口予旋回を持つLNG用遠心圧縮機の開発 (GT-27202)、磁気軸受によってインペラを軸方向に移動させクリアランスと圧縮機性能の関係を調べたもの (GT-282000)、入口羽根角およびソリディティをスパン方向に変えた3次元ディフューザの有効性をCFDで調べたもの (GT-27920) が報告された。ラジアルタービンのセッションでは1次元性能予測法の改良 (GT-27057, GT-27722)、実験とCFDで斜流インペラに設けられたスキヤロップのタービン性能への影響を解析したもの (GT-27330)、クリアランス流れをCFDで解析し、Scraping流れと流れのバランスとインペラ周速、圧力比などとの関係を分析したもの (GT-27807)、脈動流下での可変ノズル付斜流タービンの性能を実験的に調べたもの (GT-28323) が報告された。

原稿受付 2007年7月4日

\*1 ㈱IHI 回転流体機械開発部

〒235-8501 横浜市磯子区新中原1番地

## 5.3 非定常流れと数値流体力学

渡辺 紀徳\*<sup>1</sup>

WATABNABE Toshinori

最近のTurbo Expoでは、従来の専門分野別委員会が企画するセッションによる構成だけでなく、委員会間のジョイントセッションを組む動きが活発化している。今回もターボ機械委員会と構造・力学委員会や伝熱委員会との合同セッションが組まれた。特に構造・力学委員会との相互乗り入れセッションは9セッションに上り、非定常空力・流体関連振動の分野で研究が活発に行われている様子が如実に表れていた。

圧縮機流れの不安定現象に関する論文発表が非常に多く、失速・サージのセッション3つで12件の発表があったが、これら以外でも関連する論文があり、合わせて24件程度が圧縮機流れ不安定性に関するものであった(例えばGT2007-27634, 27926など)。翼端間隙流れのセッションも3つあって、13編の論文が発表されたが、この中にも旋回失速の初生を扱うものがあった(27725, 28278など)。また、ケーシングトリートメントの失速抑制機構解明を目指す研究も5件発表された(27365, 27571, 27581, 27582, 28140)。失速の発生やトリートメントの効果に関連して、非常に綿密な実験結果(27210, 27211, 27581)や、単段低速圧縮機を対象とする基礎的な実験結果と丁寧な解析結果が提示された(27181)。一方、不安定現象の発生機構に、翼間流路における逆流領域のモデル化で迫っている論文があり、独自性の高い研究として注目された(27378)。グロー放電によりプラズマを流れ場に加え、短波長擾乱を抑制する研究もあった(27673)。

タービン非定常流れに関するセッションが2つあり

原稿受付 2007年7月23日

\* 1 東京大学大学院 工学系研究科 航空宇宙工学専攻  
〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1

(1つはターボ機械と伝熱とのジョイント)、9件の発表が行われた。非定常流れに対するクロッキング効果(27323, 27639, 27848)、軸方向間隙の効果(27670)、翼負荷の効果(27452)等に関する論文があった。

空力騒音に関して2セッションで9件の発表があった。ジェット騒音についてはCFDによる検討がなされている(28117, 28193, 28334)。航空機全体の騒音を低減するため高揚力装置の抵抗を減少させ、その結果不足する抵抗をエンジン排気に旋回を与えることで確保するというair-brakeによる騒音低減の研究がなされた(27635)。エントロピー騒音に関する実験(27300)も注目された。また、燃焼振動と騒音に関連する論文も2編あった(27342, 28027)。

構造・力学委員会とのジョイントによる空力弾性・流体関連振動に関するセッションが4つあり、14件の発表がなされた。実用的な観点から、非軸対称擾乱のフラッターへの影響(27503)、ディスク振動を含めたミスマッチング効果(27227)、翼端間隙流れと非同期振動との関係(27286)など、複雑な現象が研究されている。フラッター余裕の実験的な同定法が検討され、注目されていた(27462)。

数値流体力学関係では、解析法のセッションが2つ(7論文)、圧縮機・タービン流れへの応用のセッション3つ(8論文)、数値設計と最適化に関するセッション3つ(10論文)があり、全部で25編の論文が発表された。数値設計法の高度化を目指す研究が多く見られ、タービンの多段数値設計(27195, 27197)、冷却空気やシュラウドの影響など複雑な流路を考慮した設計(27002, 27228, 27669, 27744)、高負荷タービン翼形状の数値最適化(27430, 27603, 27734, 28041)などが報告された。

## 6. 伝熱関係

瀧 博資\*<sup>1</sup>

TAKI Hiroshi

### 1. 全般

伝熱関係は、General Interestとして91件、Transitionとして9件、Internal Air & Sealsとして18件、その他

原稿受付 2007年7月11日

\* 1 川崎重工工業(株) ガスタービンビジネスセンター  
〒673-8666 明石市川崎町1-1

Combustor Heat Transferとして8件の発表があった。そのうちGeneral Interestでは内部冷却空気通路の冷却強化構造(乱流促進リブ、インピンジメント冷却構造、ピンフィン構造等)を取り扱ったもの(21件)、フィルム冷却に関するもの(42件)の発表数が例年どおり多い。

## 5.3 非定常流れと数値流体力学

渡辺 紀徳\*<sup>1</sup>

WATABNABE Toshinori

最近のTurbo Expoでは、従来の専門分野別委員会が企画するセッションによる構成だけでなく、委員会間のジョイントセッションを組む動きが活発化している。今回もターボ機械委員会と構造・力学委員会や伝熱委員会との合同セッションが組まれた。特に構造・力学委員会との相互乗り入れセッションは9セッションに上り、非定常空力・流体関連振動の分野で研究が活発に行われている様子が如実に表れていた。

圧縮機流れの不安定現象に関する論文発表が非常に多く、失速・サージのセッション3つで12件の発表があったが、これら以外でも関連する論文があり、合わせて24件程度が圧縮機流れ不安定性に関するものであった(例えばGT2007-27634, 27926など)。翼端間隙流れのセッションも3つあって、13編の論文が発表されたが、この中にも旋回失速の初生を扱うものがあった(27725, 28278など)。また、ケーシングトリートメントの失速抑制機構解明を目指す研究も5件発表された(27365, 27571, 27581, 27582, 28140)。失速の発生やトリートメントの効果に関連して、非常に綿密な実験結果(27210, 27211, 27581)や、単段低速圧縮機を対象とする基礎的な実験結果と丁寧な解析結果が提示された(27181)。一方、不安定現象の発生機構に、翼間流路における逆流領域のモデル化で迫っている論文があり、独自性の高い研究として注目された(27378)。グロー放電によりプラズマを流れ場に加え、短波長擾乱を抑制する研究もあった(27673)。

タービン非定常流れに関するセッションが2つあり

原稿受付 2007年7月23日

\* 1 東京大学大学院 工学系研究科 航空宇宙工学専攻  
〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1

(1つはターボ機械と伝熱とのジョイント)、9件の発表が行われた。非定常流れに対するクロッキング効果(27323, 27639, 27848)、軸方向間隙の効果(27670)、翼負荷の効果(27452)等に関する論文があった。

空力騒音に関して2セッションで9件の発表があった。ジェット騒音についてはCFDによる検討がなされている(28117, 28193, 28334)。航空機全体の騒音を低減するため高揚力装置の抵抗を減少させ、その結果不足する抵抗をエンジン排気に旋回を与えることで確保するというair-brakeによる騒音低減の研究がなされた(27635)。エントロピー騒音に関する実験(27300)も注目された。また、燃焼振動と騒音に関連する論文も2編あった(27342, 28027)。

構造・力学委員会とのジョイントによる空力弾性・流体関連振動に関するセッションが4つあり、14件の発表がなされた。実用的な観点から、非軸対称擾乱のフラッターへの影響(27503)、ディスク振動を含めたミスマッチング効果(27227)、翼端間隙流れと非同期振動との関係(27286)など、複雑な現象が研究されている。フラッター余裕の実験的な同定法が検討され、注目されていた(27462)。

数値流体力学関係では、解析法のセッションが2つ(7論文)、圧縮機・タービン流れへの応用のセッション3つ(8論文)、数値設計と最適化に関するセッション3つ(10論文)があり、全部で25編の論文が発表された。数値設計法の高度化を目指す研究が多く見られ、タービンの多段数値設計(27195, 27197)、冷却空気やシュラウドの影響など複雑な流路を考慮した設計(27002, 27228, 27669, 27744)、高負荷タービン翼形状の数値最適化(27430, 27603, 27734, 28041)などが報告された。

## 6. 伝熱関係

瀧 博資\*<sup>1</sup>

TAKI Hiroshi

### 1. 全般

伝熱関係は、General Interestとして91件、Transitionとして9件、Internal Air & Sealsとして18件、その他

原稿受付 2007年7月11日

\* 1 川崎重工工業(株) ガスタービンビジネスセンター  
〒673-8666 明石市川崎町1-1

Combustor Heat Transferとして8件の発表があった。そのうちGeneral Interestでは内部冷却空気通路の冷却強化構造(乱流促進リブ、インピンジメント冷却構造、ピンフィン構造等)を取り扱ったもの(21件)、フィルム冷却に関するもの(42件)の発表数が例年どおり多い。

## 2. 冷却・伝熱促進法

乱流促進リブに関する研究としては、燃焼器尾筒を対象として、昨年発表されたV型より冷却性能の良いW型リブの冷却特性の報告 (GT-27167) があった。また、フィルム冷却を模擬した吹出しのあるリブ通路を回転させた場合の流れと熱伝達の特性的について、45° 角度付きのリブでは昨年度報告のあった90° 角度付きのリブとは異なることが示された (GT-27166)。その他翼の前縁付近を模擬した1:4のアスペクト比を持つ通路 (GT-27067) や翼の後縁付近を模擬した台形形状の通路 (GT-28093) など、種々の断面形状を持つリブ通路の回転場における熱伝達率特性に関する研究が行われている。

ピンフィン冷却に関する研究では、ピンフィン列を持つ矩形ダクト内の基礎データ取得を目的とした研究 (GT-27431, 27432など) の他、ピンが側壁に対して角度を持って取付けられた場合に、冷却効果が最大で50%近く減少することが示した実験結果 (GT-28138)。ピン列のような突起を180° 転向する冷却通路の先端に配置することでほとんど圧損の増大なしに翼先端部の冷却を20%以上強化する手法 (GT-27009) も提案された。

インピンジメント冷却に関する研究でも、噴流の間隔やレイノルズ数、温度比をパラメータとした基礎データ取得を目的とした研究 (GT-28292,29293) の他にターゲット面が傾いている場合の影響 (GT-27055) や前縁を模擬した一連の研究の一環としてクロスフローの影響 (GT-28212) を調査したものがある。また燃焼器ライナーを対象とした研究では、波型のプレートに噴流孔を設置した形態に対してクロスフローによる効率低下の影響を緩和するためのプレート形状の検討 (GT-27390) がユニークである。

## 3. 翼外面の熱伝達

翼外面の熱伝達率に関する研究としては、翼面粗さに着目したGT-27285があり、規則的なパターンの粗さと不規則な粗さでは熱伝達の特性が異なるものの、種々の粗さパターンでの基礎データ取得が重要であると述べている。また、昨年に引き続き翼根のフィレットとEndwall ContouringがEndwallの熱負荷を低減する研究 (GT-28179) があった。

動翼外面で熱負荷の高い翼先端の熱伝達に関する研究としては、動翼先端の漏れ流れとその熱伝達について様々なパラメータ (形状、クリアランス、ケーシングとの相対運動) が及ぼす影響と更に翼先端にフィルム冷却がある場合の影響等を実験的及び解析的に研究したもの (GT-27954,27957,27368) が系統立てられていて分かりやすい。他にTIPの漏れ流れについての解析的な研究は

(GT-27728,27708) を参照されたい。また、実機に近い条件で動翼先端のケーシングにステップをつけた場合に実機に近い条件で熱負荷が30%減少する事例 (GT-27780) や翼先端付近のフィルム冷却について主流インシデンスの影響を調べた研究 (GT-27066) もある。

## 4. フィルム冷却

テーマは、フィルム孔の配置、形状の工夫によるフィルム効率の向上、静翼エンドウォール、回転翼等の複雑な三次元流れ環境下のフィルム冷却空気の流れ、各種流体モデルによるCFDによる予測精度の改善などである。

フィルム孔の配置、形状の工夫による効率改善は、フィルム孔を3つに枝分かれさせて渦の干渉を利用する方法 (GT-27528)、フィルム孔をTrenchと呼ばれる溝に埋め込む方法 (GT-27996)、角度を変えて配置した2列のフィルム孔の干渉を利用する方法 (GT-27301) 等が提案されている。各手法ともに試験、CFD等で効果の確認、改善機構の考察等が行われていた。

基礎形状の要素試験では、上述の各種改良形状に関する試験、翼内部流路のクロスフローのフィルム冷却性能への影響 (GT-27102)、翼後縁の衝撃波によるフィルム冷却への干渉 (GT-27482) 等が発表された。実翼形状の試験として、静翼プラットフォーム (GT-27867, 27092, 27131)、圧力面側の複数フィルム孔列の干渉問題 (GT-27546)、フィルム孔を溝に埋め込むことによる性能改善効果 (GT-28003,27921,27992) 等が発表された。試験手法としては、ここ数年PSP (感圧塗料) を用いたフィルム冷却効率可視化試験が多数発表されている。

CFDに関しては、LES、DNSを用いた冷却のフィルム効率、熱伝達解析が発表されていた (GT-28156など)。計算精度は何れも良好である。一方、計算コストの面ではRANSモデルの使用が現実的であるとして、強い乱れ条件下での各種のRANSモデルの比較 (GT-27184, 27689,27690)、非等方モデルによる計算精度の改良 (GT-27182) も提案されている。以上は何れも単独のフィルム孔周りの流れを詳細に解析しているが、要素実翼形状での解析として、フィルム冷却翼全体を4000万要素という大規模なモデルで解析した例も報告されている (GT-27497)。

## 5. その他

その他、燃焼器の出口温度分布が初段のタービン翼に与える影響についても昨年に続いての報告 (GT-27156, 27157) があった。GT-27457は、冷却設計効率化のためにどのようにCFDを利用すればよいかが論じられており、冷却翼設計者の参考となるだろう。



## 7. 燃焼および燃料関係

小金沢 知己\*<sup>1</sup>

KOGANEZAWA Tomomi

### 1. 全般

燃焼および燃料関係 (Combustion & Fuels) のコミッティーでは、2室を使用して21件のペーパーセッションが開催された。発表件数は例年並の89件であった。そのうち2/3は大学等からの発表で、その他は公的研究機関が多く、メーカからの発表は10件程度と少な目であった。ただ、大学からの発表スライドの中にもメーカロゴの入ったものがあり、メーカが燃焼の基礎研究を大学に委託し、役割分担によって燃焼器開発加速を図っている様子が見られた。

国別では米、独が各1/3を占め、イタリア、スイス、カナダ、その他の国を含めて14カ国程度であった。分野別では、燃焼不安定性に関するものが5セッション、次いで燃料多様化に関するものが4セッション、燃焼モデル/動力学に関して3セッションと続いていた。筆者が実験的アプローチの発表を中心に聴講したこともあり、燃焼振動と石炭ガス化ガスをテーマとした研究が多いという印象を受けた。

また、数値解析と試験・計測を両方行なって比較した発表も多く、市販の解析ツール (CFDソフト) とレーザ計測ツールの使い勝手や精度の向上に伴って、両者が比較的容易にルーチンワーク的に使われつつあると感じられた。

### 2. 燃焼不安定性 (燃焼振動)

振動火炎の観察では、エアブラスト旋回バーナでリフト火炎を作り火炎の上流外側にできる循環流が保炎を支配している様子を観察したもの (GT-27126)、エアブラストノズルの空気流量を強制振動させ、ミー散乱で燃料噴霧量変動を、OH\*発光で熱発生量変動をそれぞれ計測して両者の位相差を比較したもの (GT-27310)、PLIF計測でガス炎旋回火炎の非線形応答特性を検討したもの (GT-27932)、CO<sub>2</sub>\*で発熱変動を計測し、ステップ背面に保炎された石炭ガス化ガス火炎の安定範囲を試験したもの (GT-28130) 等があった。

また、実験結果と解析結果の比較を行ったものとして、二重旋回バーナのflame transfer functionを比較したもの (GT-27267)、予混合旋回バーナのScattering

MatrixをCFDから求め、OH\*発光計測による火炎の周波数応答実験結果と比較したもの (GT-27238)、解析と実験から燃空比変動に対する予混合器のダンピングを評価したもの (GT-27937) があった。

アクティブ制御についても、圧力変動とバーナ温度を計測して、パイロット燃料比率をアクティブ制御するもの (GT-27266)、ジェットA燃料を高速アクチュエーターで流量制御しアクティブ制御するもの (GT-27637) が報告された。

### 3. 燃料多様化

燃料多様化セッションを筆者は聴講していないが、聴講した他のセッション中にも石炭ガス化ガスを対象としたものがあり、燃料多様化が大きな研究分野となっていると感じられた。例えば、予混合燃焼セッションでは、低旋回ノズルのH<sub>2</sub>-Air、H<sub>2</sub>-N<sub>2</sub>-Air予混合火炎の安定範囲の試験結果 (GT-27512) や、石炭ガス化ガス用二重逆旋回型予混合器の濃度分布の計測結果と解析結果の比較 (GT-27878) が示された。また、着火/逆火セッションでは、H<sub>2</sub>-CH<sub>4</sub>-Air予混合気火炎伝播を数値解析した結果 (GT-28132)、およびCH<sub>4</sub>燃料へのH<sub>2</sub>添加が燃焼振動に与える影響を試験し、PLIFで火炎観察した結果 (GT-28158) が報告された。

### 4. 反応動力学

燃焼解析分野で筆者が聴講した反応動力学のセッションでは、ジェットA1燃料とバイオケロシンについて、反応動力学計算を行い、ジェット攪拌反応器のデータと比較したもの (GT-27145)、CH<sub>4</sub>-Air燃焼中のNO<sub>x</sub>生成について8ステップメカニズムで計算し、ジェット攪拌反応器のデータと比較したもの (GT-27990)、天然ガスの着火遅れと燃焼速度に対するC<sub>4</sub>、およびC<sub>5</sub>種の影響を解析したもの (GT-28039)、石炭ガス化ガス向けに、高温空気中での層流燃焼速度に対するH<sub>2</sub>、CO、CO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>、およびO<sub>2</sub>の影響を計測したもの (GT-27967) があり、反応解析と計測データを比較したものは、結果は、よく一致しているということであった。

原稿受付 2007年7月10日

\* 1 ㈱日立製作所 電力・電機開発研究所

〒312-0034 茨城県ひたちなか市堀口832-2

## 8. 制御と診断

中北 智文\*1

NAKAKITA Tomofumi

### 1. 全般

制御と診断のCommitteeでは1つのチュートリアルセッション、2つのパネルセッション、そして10のテクニカルセッションの合計13セッションが開かれ、発表総数としては52件と昨年同様の件数であった。その内訳は、制御システムが2セッションで6件、診断が8セッションで33件、スマートセンサを含む計装が3セッションで13件であった。本稿では、診断を中心に報告する。

### 2. 制御

制御理論では、実時間モデルで推定した推力を制御するとともに可変静翼を最適制御するモデルベースド制御 (GT-27214)、エンジン性能の変動や外部擾乱等の影響下での制御系のロバストさと性能を評価し最適化を図る方法 (GT-27666) に関する発表があった。また、流量を制御できる可変燃料ポンプに関する発表 (GT-27948) があった。別のコミッティでは、アクティブストール制御を想定したストール予兆検知に関する報告 (GT-28199) や、アクティブ燃焼制御に関する報告があった (GT-27266, 27473, 27637, 27796)。

### 3. 診断

Fusion, Small Business, そして個別の診断技術の3つのカテゴリーに分けて紹介する。

①Fusion Fusion関連で一つのセッションが設けられるなど、Fusionという概念が診断技術の一つの大きな潮流であるとの印象を受けた。これは、複数の診断の結果から総合判断を行うことで診断精度を向上させる技術である。

GEは、様々な診断 (GT-27519, 27856, 27941, 27950, 28011, 28331) の結果をFusionし整備の意思決定支援を行う階層的モニタリングシステム (GT-27174) について発表した。構成要素である診断技術の中から二つ紹介する。一つは、電子制御装置に記録されるエラーメッセージ (例えばアクチュエータの指令値とアンサーバックのかい離) を、その発生頻度と関連する定量的指標に変換することにより、予防診断を行う技術である (GT-27941, 28011)。もう一つは、下位の診断層における診断の確かさと、誤診によるコストイン

パクトをFusionし、診断結果の統合を図るという意味決定技術である (GT-28331)。

GEの発表以外では、複数の故障診断結果のFusion (GT-27043, 27862, 28343)、診断結果とモデル予測結果のFusion (GT-27984) 等の発表があった。

②Small Business 診断技術は、政府機関の支援のもとに小規模企業や大学等の研究機関が開発した技術が商品化された成功例の一つであり、本会議でトピックス的に取り上げられた。

パネルセッションでは、RR, GE, PW, カナダ国立研究機構、そして米海軍航空システム司令部からパネリストを迎え、Small Businessが成功するための重要な鍵などについて論じられた。共通して論じられた鍵は、エンドユーザーやOEM (Original Equipment Manufacturer) そして政府機関のニーズと動向を注視すること、JSF (Joint Strike Fighter) のような国際プログラムに参加すること、現実的で定量的なゴールを明瞭に持つこと、政府機関の支援終了後にOEM等との協力体制や事業化に関する明確な計画を持つことであった。

ペーパーセッションでは、Intelligent Automation Corporation (GT-27894)、Impact Technologies (GT-27984)、Scientific Monitoring (GT-28026) そしてLuna Innovations Incorporated (GT-28262) から、最新の技術開発の状況等について報告があった。

③個別診断技術 著者が関心を惹かれた発表をいくつか挙ると、20Hzで記録されたデータの中から代表的な計測点を実時間で選択しそのデータから実時間診断モデルの誤差を飛行条件の関数として経験的に求めモデルを補正する方法 (GT-27535)、劣化診断結果を実時間診断モデルに反映する方法 (GT-27518, 27862)、センサのバイアスやドリフトを評価する方法 (GT-27324)、ファジー理論と繰り返し法を用いて多重故障にも対応できる故障診断方法 (GT-27442)、過去の整備サイクルから抽出した劣化パターンに基づき現時点以降の劣化を予測する方法 (GT-27672) 等があった。

### 4. 計装

燃焼制御を想定した計装技術に関する発表が多い (GT-27164, 27264, 27475, 27556, 27865, 27876, 27862)。また、高応答のエントロピーセンサ (GT-27450)、ブレードの固有振動や減衰率を測定する方法 (GT-28151) 等の発表があった。スマートセンサ関連のパネルセッションでは、温度や振動などの苛酷な環境

原稿受付 2007年7月3日

\*1 株式会社IHI 航空宇宙事業本部  
技術開発センター 制御技術部

〒190-1297 東京都西多摩郡瑞穂町殿ヶ谷229

に対する耐性について論じられた。700℃級の耐熱性を有するセンサや、500℃級の耐熱性を有する交流増幅器

も開発されたようである。

## 9. 材料・構造および製造技術

小嶋 洋太\*1  
KOJIMA Yota

材料・構造および製造技術分野については、レクチャーセッション1、チュートリアルセッション1、パネルセッション4、ペーパーセッション6の計12セッションが開催され、発表数では、各セッションで1件、4件、13件、23件の合計41件であった。

テーマ別で見ると、補修技術の11件が最多であり、次いでコーティングの8件、新(改良型)材料の6件、以下、機械加工・製造プロセス、次世代タービン部品の展望、経験事例報告の各4件、劣化・寿命予測3件、モデリング&シミュレーション1件の順となっている。その主だった案件について、以下に紹介していくこととする。

まず、補修技術関連で目を引かれたのは、GE, Pratt and Whitney (P&W), SIEMENSといったOEMによる積極的な補修技術開発報告である。チュートリアルセッション、パネルセッションにおいて、自社製の損傷事例を示しつつ、その補修技術について紹介。タービン動翼については、主要損傷部である翼頂部に対する自動レーザー補修溶接適用や、近年適用が増加傾向しつつあるDirectional Solidified (DS) 翼, Single Crystal (SC) 翼の翼頂部・プラットフォーム部補修を対象として予熱溶接補修の取り組み事例が多数報告されていた。また、タービン静翼(ノズル)補修については、その標準となりつつあるろう付け補修の技術開発事例として、自社開発のろう材をクローズアップ。GE社は自社開発ろう材ADH (Achieved Diffusion Healing) の改良版となるRe-NewAlloyを、P&WはTLMを、また、補修業者であるLiburdiもLPM (Liburdi Powder Metallurgy) を大きく押し出し、母材強度に匹敵するその強度特性を強調。Co合金翼の幅広隙間(亀裂)部、広範囲に散在する微小亀裂へのこれら新ろう材の適用事例紹介が多数なされていた。また、ペーパーセッションの中においても、これら先端補修技術事例の一部(GT-28208)や、Ni基ろう材(BNi-9)を使用したX-45材の幅広隙間部ろう付けのマイクロ観察(GT-27340)、IN738+30%BNi-9にルテニウム(Ru)、レニウム(Re)、イットリア(Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)を混入した改良型ろ

う付けのマイクロ観察(GT-27129)が発表されており、ろう付け補修技術に対する注目の高さが伺えた。

次にコーティング関連においては、耐熱コーティング(TBC)に関するものを中心に報告されていた。ボンドコーティングの溶射方法(LPPS, APS)とTBCの溶射方法(APS, たて割れ)を組み合わせ、それぞれの実運転後の状態を比較することで溶射方法の寿命に対する影響を評価した結果(GT-28352)では、その溶射方法による顕著な差異が見られず、各方法のプロセス管理の重要性が述べられていた。また、TBCのはく離状況やボンドコートの酸化状態を検出するための非破壊検査技術として、渦電流計測器を用いたもの(GT-27852, GT-27392)や電力場計測を組み合わせたもの(GT-27526)が開発されつつあり、定期点検における余寿命評価方法として期待される。これらはいずれもタービン翼の持つ寿命を最大限に活かすことを目的としたものであり、前述の補修技術とあわせ、ライフサイクルコストの低減をテーマとした取り組みが活発と言える。また、定期点検におけるクリアランス管理に関する将来展望(GT-27059)、TBCの亀裂の初期発生・伝播メカニズムをモデリングにより解析したもの(GT-27489)や、従来のPVDより厚く圧縮機翼への耐侵食コーティングを行うPEMS (Plasma Enhanced Magnetron Sputtering) というコーティング技術の報告(GT-27027)なども見られた。

一方、母材自体に関しては、新材料の特性評価報告として、Canon-Muskegonによって開発されたIN939の溶接性改良型新材料CM939についての高い機械特性(延性・強度)や製造性(GT-27239)や、Ti-48Al-2Cr-2Nb材にタングステンを含め、溶体化・時効熱処理を行うことでクリープ特性が劇的に改善された事例(GT-27437)、高クリープ強度と製造性を併せ持つ新鍛造合金HAYNESS282の低サイクル疲労に関する試験結果(GT-28267)等が昨年度の続報も含めて報告された。また、数値解析案件としては、GTD-111DSをサンプルとしてクリープ寿命評価を行う手法である $\theta$ モデルでの解析を行い、その有効性について示したのが見られた(GT-28345)。その他、HASTELLOYX, HAYNES230, HR-120, 214といった耐熱合金の高温環境下における酸化現象を360日にわたって調査し、アルミ合金の214材

原稿受付 2007年7月9日

\*1 三菱重工業株式会社 高砂製作所 工作部 生産技術課  
〒676-8686 兵庫県高砂市荒井町新浜2丁目1-1

に対する耐性について論じられた。700℃級の耐熱性を有するセンサや、500℃級の耐熱性を有する交流増幅器

も開発されたようである。

## 9. 材料・構造および製造技術

小嶋 洋太\*1  
KOJIMA Yota

材料・構造および製造技術分野については、レクチャーセッション1、チュートリアルセッション1、パネルセッション4、ペーパーセッション6の計12セッションが開催され、発表数では、各セッションで1件、4件、13件、23件の合計41件であった。

テーマ別で見ると、補修技術の11件が最多であり、次いでコーティングの8件、新(改良型)材料の6件、以下、機械加工・製造プロセス、次世代タービン部品の展望、経験事例報告の各4件、劣化・寿命予測3件、モデリング&シミュレーション1件の順となっている。その主だった案件について、以下に紹介していくこととする。

まず、補修技術関連で目を引かれたのは、GE, Pratt and Whitney (P&W), SIEMENSといったOEMによる積極的な補修技術開発報告である。チュートリアルセッション、パネルセッションにおいて、自社製の損傷事例を示しつつ、その補修技術について紹介。タービン動翼については、主要損傷部である翼頂部に対する自動レーザー補修溶接適用や、近年適用が増加傾向しつつあるDirectional Solidified (DS) 翼, Single Crystal (SC) 翼の翼頂部・プラットフォーム部補修を対象として予熱溶接補修の取り組み事例が多数報告されていた。また、タービン静翼(ノズル)補修については、その標準となりつつあるろう付け補修の技術開発事例として、自社開発のろう材をクローズアップ。GE社は自社開発ろう材ADH (Achieved Diffusion Healing) の改良版となるRe-NewAlloyを、P&WはTLMを、また、補修業者であるLiburdiもLPM (Liburdi Powder Metallurgy) を大きく押し出し、母材強度に匹敵するその強度特性を強調。Co合金翼の幅広隙間(亀裂)部、広範囲に散在する微小亀裂へのこれら新ろう材の適用事例紹介が多数なされていた。また、ペーパーセッションの中においても、これら先端補修技術事例の一部(GT-28208)や、Ni基ろう材(BNi-9)を使用したX-45材の幅広隙間部ろう付けのマイクロ観察(GT-27340)、IN738+30%BNi-9にルテニウム(Ru)、レニウム(Re)、イットリア(Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)を混入した改良型ろ

う付けのマイクロ観察(GT-27129)が発表されており、ろう付け補修技術に対する注目の高さが伺えた。

次にコーティング関連においては、耐熱コーティング(TBC)に関するものを中心に報告されていた。ボンドコーティングの溶射方法(LPPS, APS)とTBCの溶射方法(APS, たて割れ)を組み合わせ、それぞれの実運転後の状態を比較することで溶射方法の寿命に対する影響を評価した結果(GT-28352)では、その溶射方法による顕著な差異が見られず、各方法のプロセス管理の重要性が述べられていた。また、TBCのはく離状況やボンドコートの酸化状態を検出するための非破壊検査技術として、渦電流計測器を用いたもの(GT-27852, GT-27392)や電力場計測を組み合わせたもの(GT-27526)が開発されつつあり、定期点検における余寿命評価方法として期待される。これらはいずれもタービン翼の持つ寿命を最大限に活かすことを目的としたものであり、前述の補修技術とあわせ、ライフサイクルコストの低減をテーマとした取り組みが活発と言える。また、定期点検におけるクリアランス管理に関する将来展望(GT-27059)、TBCの亀裂の初期発生・伝播メカニズムをモデリングにより解析したもの(GT-27489)や、従来のPVDより厚く圧縮機翼への耐侵食コーティングを行うPEMS (Plasma Enhanced Magnetron Sputtering) というコーティング技術の報告(GT-27027)なども見られた。

一方、母材自体に関しては、新材料の特性評価報告として、Canon-Muskegonによって開発されたIN939の溶接性改良型新材料CM939についての高い機械特性(延性・強度)や製造性(GT-27239)や、Ti-48Al-2Cr-2Nb材にタングステンを含め、溶体化・時効熱処理を行うことでクリープ特性が劇的に改善された事例(GT-27437)、高クリープ強度と製造性を併せ持つ新鍛造合金HAYNESS282の低サイクル疲労に関する試験結果(GT-28267)等が昨年度の続報も含めて報告された。また、数値解析案件としては、GTD-111DSをサンプルとしてクリープ寿命評価を行う手法である $\theta$ モデルでの解析を行い、その有効性について示したものが見られた(GT-28345)。その他、HASTELLOYX, HAYNES230, HR-120, 214といった耐熱合金の高温環境下における酸化現象を360日にわたって調査し、アルミ合金の214材

原稿受付 2007年7月9日

\*1 三菱重工業株式会社 高砂製作所 工作部 生産技術課  
〒676-8686 兵庫県高砂市荒井町新浜2丁目1-1

が最も高い耐酸化性を示したことなども報告されている (GT-28269)。

最後に機械加工・製造プロセス関連であるが、圧縮機動翼に関する取り組みとして、低塑性研磨 (LPB) での圧縮性残留応力によりディスクとの接触面における腐食疲労を緩和する試み (GT-27424)、3次元的な複雑形状を持つ翼面形状を4軸マシニングセンターで加工するための自動ツール選択プログラムの開発 (GT-28169) の

2件、タービン翼 (新製) に関して、1個流し製造ラインの適用事例 (GT-27454) 1件が見られた。

著者はTurboExpoへ初参加であったため昨年との比較は難しいが、上に報告してきたように「損傷状況や補修・交換費用を精度よく予測・評価すること」、また、「その費用を低減することでライフサイクルコストを低減すること」に対する取組がセクション全体でのメインテーマとなっているように感じた。

## 10. 展 示

竹原 勇志\*<sup>1</sup>  
TAKEHARA Isashi

今年のASME Turbo EXPO開催地のモントリオールは、カナダ航空機産業のメッカであり、カナダ政府航空宇宙機関とモントリオール航空宇宙産業界が威信をかけていたのか、Exhibition (展示) についても例年以上に盛り上げようとする意気込みが感じられた。このため、ここ年々低調となっていたTurbo EXPOの展示会も、今年は、少しは以前の盛り上がりを取り戻していたように感じた。出展会社は131社で、その中で大型ブースを構えた出展は7社であった。出展数は、北米での開催ゆえか、あるいは先に書いた今年のモントリオールの事情からなのか、出展数120であった昨年度から少しは持ち直している。展示会場は、Turbo EXPO会場となったPalais Des Congres Montrealの一階に位置するQuebec Hallであり、例年のように入口にASMEの登録カウンターやASME関連の書籍販売ブースが設置されており、近年電子化された論文集CDもここでの受け取りとなっていた。なお余談であるが、Turbo Expo会議正規登録者については、今回の会議では会期中展示場の内のカフェテリアでのランチは無料となっていた。

しかしながら出展内容を見ると、相変わらずここ数年と同様、完成エンジンメーカーの出展は少なく、PW、RRやGE等の出展はあったものの、パネル展示や部品展示が多い出展内容であった。産業用GTの代表的なメーカーであるSolar、Siemens社等の出展は相変わらず見られず、また、日本からのエンジンメーカーの出展もなかった。

ここ数年のTurbo EXPO展示の傾向であるが、部品・加工・計測器に関する出展が多数を占めている。また、ANSYSやCD Adapco、Concept NREC社等の大手CFDソフトウェアメーカーが大型の出展スペースを確保しており、その存在感がかなりある。さらに、流体関連ソフトウェア会社の出展以外にも、強度解析シミュレーション

やCAE-CAM関係の出展など、ソフトウェア関連の出展は非常に充実したものであった。

今回の展示で、とりわけ人目を引いたのがBell Helicopter社で、飛行可能な実機Bell412を持ち込み、内部の構造の詳細を展示していた。最近のTurbo EXPOで機体メーカーからの出展は筆者には記憶がないが、先に述べたモントリオール航空産業界の会議への意気込みの表れであろうか。なお、搭載エンジンであるPWC社のPT6は、展示機体の中でよくわかるように工夫されていた。



図1 Turbo EXPO Entrance



図2 P&W Canada社のブース

原稿受付 2007年7月13日

\*1 川崎重工(株) ガスタービンビジネスセンター  
〒673-8666 明石市川崎町1-1

が最も高い耐酸化性を示したことなども報告されている (GT-28269)。

最後に機械加工・製造プロセス関連であるが、圧縮機動翼に関する取り組みとして、低塑性研磨 (LPB) での圧縮性残留応力によりディスクとの接触面における腐食疲労を緩和する試み (GT-27424)、3次元的な複雑形状を持つ翼面形状を4軸マシニングセンターで加工するための自動ツール選択プログラムの開発 (GT-28169) の

2件、タービン翼 (新製) に関して、1個流し製造ラインの適用事例 (GT-27454) 1件が見られた。

著者はTurboExpoへ初参加であったため昨年との比較は難しいが、上に報告してきたように「損傷状況や補修・交換費用を精度よく予測・評価すること」、また、「その費用を低減することでライフサイクルコストを低減すること」に対する取組がセクション全体でのメインテーマとなっているように感じた。

## 10. 展 示

竹原 勇志\*<sup>1</sup>  
TAKEHARA Isashi

今年のASME Turbo EXPO開催地のモンリオールは、カナダ航空機産業のメッカであり、カナダ政府航空宇宙機関とモンリオール航空宇宙産業界が威信をかけていたのか、Exhibition (展示) についても例年以上に盛り上げようとする意気込みが感じられた。このため、ここ年々低調となっていたTurbo EXPOの展示会も、今年は、少しは以前の盛り上がりを取り戻していたように感じた。出展会社は131社で、その中で大型ブースを構えた出展は7社であった。出展数は、北米での開催ゆえか、あるいは先に書いた今年のモンリオールの事情からなのか、出展数120であった昨年度から少しは持ち直している。展示会場は、Turbo EXPO会場となったPalais Des Congres Montrealの一階に位置するQuebec Hallであり、例年のように入口にASMEの登録カウンターやASME関連の書籍販売ブースが設置されており、近年電子化された論文集CDもここでの受け取りとなっていた。なお余談であるが、Turbo Expo会議正規登録者については、今回の会議では会期中展示場の内のカフェテリアでのランチは無料となっていた。

しかしながら出展内容をみると、相変わらずここ数年と同様、完成エンジンメーカーの出展は少なく、PW、RRやGE等の出展はあったものの、パネル展示や部品展示が多い出展内容であった。産業用GTの代表的なメーカーであるSolar、Siemens社等の出展は相変わらず見られず、また、日本からのエンジンメーカーの出展もなかった。

ここ数年のTurbo EXPO展示の傾向であるが、部品・加工・計測器に関する出展が多数を占めている。また、ANSYSやCD Adapco、Concept NREC社等の大手CFDソフトウェアメーカーが大型の出展スペースを確保しており、その存在感がかなりある。さらに、流体関連ソフトウェア会社の出展以外にも、強度解析シミュレーション

やCAE-CAM関係の出展など、ソフトウェア関連の出展は非常に充実したものであった。

今回の展示で、とりわけ人目を引いたのがBell Helicopter社で、飛行可能な実機Bell412を持ち込み、内部の構造の詳細を展示していた。最近のTurbo EXPOで機体メーカーからの出展は筆者には記憶がないが、先に述べたモンリオール航空産業界の会議への意気込みの表れであろうか。なお、搭載エンジンであるPWC社のPT6は、展示機体の中でよくわかるように工夫されていた。



図1 Turbo EXPO Entrance

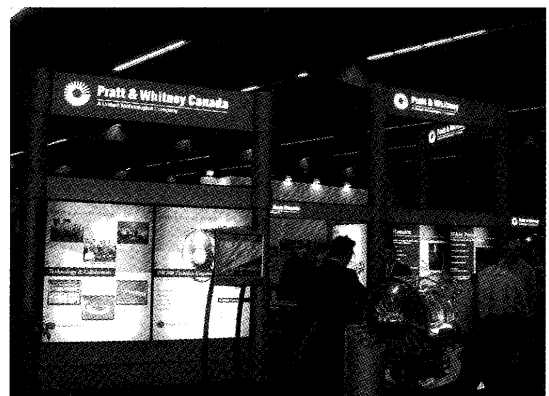


図2 P&W Canada社のブース

原稿受付 2007年7月13日

\*1 川崎重工(株) ガスタービンビジネスセンター  
〒673-8666 明石市川崎町1-1

日本企業からは、Mitsubishi Power System, アイコクアルファ, Olympus等が出展していたが、いずれも海外現地法人からの出展であった。

ASME Turbo EXPOの展示は、90年代前半までの各社の宣伝・技術アピールなどの華々しいショー的出展から、開発技術者に的を絞った実利的な出展を重視する傾向にあるようである。

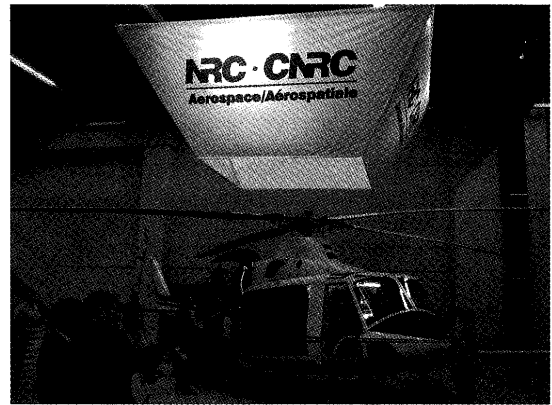


図3 Bell社のブース (Bell412実機展示)

## GTSJ 第32期委員名簿 (順不同)

### 《各委員会構成》

#### 《GT技術継続教育教材作成委員会》

○吉田豊明 (東京農工大)	福山佳孝 (JAXA)	川池和彦 (大同メタル)	北嶋潤一 (川崎重工)
新村栄一 (富士電機システムズ)		桜井茂雄 (日立)	杉村章二郎 (三井造船)
新田明人 (電中研)	船崎健一 (岩手大)	山中 矢 (東芝)	渡辺紀徳 (東大)
山本 誠 (東京理科大)	吉岡洋明 (東芝)		武石賢一郎 (阪大)
			濱崎浩志 (IHI)

#### 《選挙管理委員会》

○波江貞弘 (海技研)	北條正弘 (JAXA)	鈴木伸寿 (東芝)	長尾健一 (IHI)	室伏宏樹 (日立)
杉浦裕之 (川崎重工)	高岡孝嗣 (三菱重工)			

#### 《学術講演会委員会》

○渡辺紀徳 (東大)	古谷博秀 (産総研)	山本 武 (JAXA)	加藤 大 (IHI)	荒木秀文 (日立)
佐伯祐志 (東芝)	中台久雄 (荏原)	園田豊隆 (本田技術研究所)		平野孝典 (拓大)
赤堀広文 (川崎重工)	伊藤栄作 (三菱重工)			

## パリエアショー2007に出展・参加して

藤岡 順三\*1  
FUJIOKA Junzo

横川 忠晴\*1  
YOKOKAWA Tadaharu

原田 広史\*1  
HARADA Hiroshi

キーワード：Paris Air Show2007, Exhibition, Airbus, Rolls-Royce, MRJ, NIMS

第47回パリエアショー (47th International Paris Air Show-Le Bourget 2007) はファンボローエアショーと隔年交互に催されるもので、2007年も6月18日(月)～24日(日)に例年通りパリ中心より地下鉄・列車で約45分の郊外にあるThe Paris Le Bourget Exhibition Centreで開催された。18日(月)～21日(木)が招待客を対象としたTrade Day, 22日(金)～24日(日)は一般客が参加するPublic Dayで、来場者は延べ40万人以上、この間フライトショー、航空機野外展示、屋内各社展示、プレス発表が行われた。また、大手の航空機メーカー、エンジンメーカーなどは別途Business Chaletを設け、会期中に大きな商談が成立することもある。

### 1. フライトショーおよび野外航空機展示

エアショーの大きな楽しみはフライトショー、民間航空機に加え戦闘機、練習機、輸送機、ヘリコプター、計40機以上、毎日約20機のフライトショーが行われた(図1)。また、42社、140機の野外航空機展示が行われた。民間航空機の目玉はパリエアショー2005、ファンボローエアショー2006と同様A380-800で、野外にも展示し搭乗することができた(図2)。



図1 仏・戦闘機Dassault Rafale

原稿受付 2007年8月23日

\*1 御物質・材料研究機構 超耐熱材料センター  
〒305-0047 茨城県つくば市千現1-2-1

### 2. 屋内展示

本会場となる6つの建屋にエアライン、航空機メーカー、エンジンメーカー、航空機・エンジンの素材・部品製造会社、大学・研究機関、コンサルタント会社、出版社など42ヶ国、約2000社の出展があった。

#### 2.1 日本企業・機関の展示

物質・材料研究機構(NIMS)は第3～5世代Ni基単結晶ブレード、Ni-Co基タービンディスク合金のパンケーキとコンプレッサー・ブレード、EQコーティング、ロールスロイス航空宇宙材料センターなどについて実物と説明パネルを展示した(図3)。宇宙航空研究開発機構は日本では最も大きなブースを有し、VaRTM法による民間航空機用FRP翼試作品を展示していた。日本航空宇宙工業会が取りまとめた10社のブース(三菱重工、川崎重工、富士重工、新明和工業、IHI、三菱マテリアル、島津製作所、住友精密工業、カヤバ、ナビスコ)では、三菱重工が国産リージョナルジェット(MRJ)の客室のモックアップ展示を行って注目を集め、大勢の見学者で溢れていた。MRJは座席数70～90席の小型ジェット旅客機で、全長35.8m(90人乗り仕様)。出展されたモックアップはキャビン部分で、長さ8.89m、幅2.90m、高さ2.90m。エンジンは、RR、GE、そして最近P&Wも名乗りを上げ、今年度秋までに選定される。18日には記者会見が開催された。(図4、5)



図2 Airbus社の2階建A380-800





図3 物質・材料研究機構の展示品

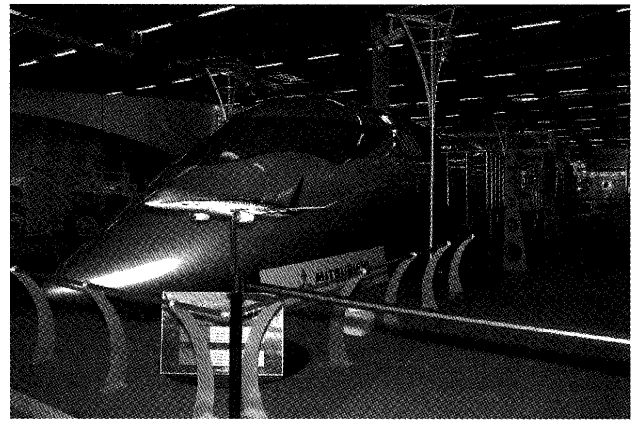


図4 MRJモックアップ

川崎重工はまもなく同時初飛行のPX, CXの模型とその民間転用 (YCX, YPX), 富士重工はT-5初等練習機と防衛省ヘリの模型, IHIはCF34-8Cのエンジンとその部品, 新明和工業は新しい飛行艇US-2模型, 三菱マテリアルはリング鍛造試作タービンケースやCF34のLPTモジュール, 島津製作所は始めてシステムとして受注したB747-8用フラップコントロールシステム, 住友精密工業はCRJ-700のランディングギア, カヤバはボーイング向け各種アクチュエータ, ナビスコはB787の配電盤を展示していた。宇部興産はResin Transfer Mold法による耐熱CFRPの展示を行っていた。



図5 MRJモックアップの客室

## 2.2 海外各社の展示

中型・大型航空機では, Airbus社ブースが最も大きくて見学者も多くA380とA350XWBの模型を展示していたが, Boeing社の展示は今回なかった。小型リージョナルジェット旅客機 (RJ) では, カナダのBombardier社, ブラジルのEmbraer社, ロシアのSUCHOI社 (Superjet 100: 75/95座席の客室モックアップ。エンジンSaM146は14,000-17,000lb), および中国のAVIC I (ARJ-21: 79-90席の模型, エンジンはCF34-10A) の展示があった。Superjet 100, ARJ-21共に2008年就航予定である。特に, 中国はChina Aviation Industry Corporation (AVIC I, AVIC II, CATIC) が大きなブースで展示を行い見学者も多く2日目には会社カタログはすでになくなる盛況ぶりであった。

中型以上のエンジンでは世界のほとんどの主要メーカーがエンジンの実物を展示していて, Rolls-Royce社 (A380フライトテストに使用したTrent900), GE社 (GE90-115B, GENx部品: TiAl LPT Blade, FRP Fan Blade/Case), Pratt&Whitney社 (Geared Turbofan Engineのパネルとデモビデオ), Safran社・SNECMA (SaM146), CFM56 (バイオ燃料エンジン), CFM Int.社 (A320ファミリー用CFM-56-5A1-5B), Engine Alliance社 (GP7200のパネル・ビデオ・高温部品), IAE社 (V2500), MTU社 (A318用PW6000) の展示があった。

部品メーカー, 材料メーカーなどについては, 展示企業は欧米, ロシア, 中国, 韓国など世界中から集まっており, 主要な航空機メーカー・エンジンメーカーの部品・材料調達先が広くグローバル化していることを今回も強く感じた。例えば, 韓国唯一のジェットエンジンメーカー Samsung TechWin社のGENx, CFMおよびTrent900の部品展示, ロシアの軽合金メーカーVSMPO-AVISMA社が作っているTi鍛造・Landing Gear製造の世界プロジェクトなどである。ガスタービン高温高圧部品材料のメーカー・開発機関では, ファンボローエアショーと同様, タービンブレード用単結晶合金は我々NIMSとDoncaster社(株)が, ディスク用鍛造合金はAubert&Duval社(株)とLeitritsch社(株)の展示があった。

## 3. プレスコンファレンス, 報道

会期中Trade Dayに主要航空機メーカーなどのプレスコンファレンスが開催され, そのうちAirbus社, Boeing社, Bombardier社のものを聴講したが, 特にAirbus社ではLouis Gallois CEOの他6人の役員が出席し, 聴衆と報道陣の最も多いものであった。

会場では門を入ると連日主要航空関連雑誌が配られ, 日本の記事として, 三菱重工の「Mitsubishi Seeks Regional Jet Partners」, 川崎重工の「Kawasaki rolls

out two aircrafts」の記事が掲載された。Airbus社とBoeing社のバリエアショーでの受注合戦ではAirbusに軍配が上がった。Airbus社は425機（約620億ドル：約7兆6000億円）の受注と303機の購入意思表示を獲得した。このうちA350XWBについては141機の受注と52機の購入意思表示を獲得した。Boeing社は125機の受注のみであった。Rolls-Royce社はかつてない大きなセールスを記録した。すなわち、Qatar航空より80機のA350XWB用に56億ドルのTrentXWB、US Airwaysより22機のA350XWB用に18億ドルのTrentXWBを受注し、TrentXWB搭載のA350XWBの受注は113機となった。

6月のバリは暑い日もあったが比較的過ごしやすい気候であった。フライトショーや航空機展示、航空機・エ

ンジン産業を広くカバーする展示、プレスコンファレンスや報道からの情報収集、これらの見聞を通して航空宇宙産業全体の中でのジェットエンジンの現状・動向と将来展望を把握する機会を得ることができた。今後、各クラスの航空機用ジェットエンジンの動向が注目される。すなわち、リージョナルジェットではMRJのエンジン選定が今年秋までに行われる。短通路型航空機（ポストB737, A320）ではBoeing, Airbus社とも、現状の技術では目標の15%直接運航費低減に対し約10%しか達成できないとして、プロジェクト時期を明らかにしていないがエンジン開発はすでに始まっており、特にPost-V2500の開発体制がまだまだ不透明である。またワイドボデー機A350XWB用エンジンではB777クラス座席数機でGE社が参加するかどうか注目される。

## 解説：ガスタービンの出力は寸法の2乗に比例するのか、3乗に比例するのか？

学会誌編集委員会

学会誌Vol.35, No.2, p.2に掲載された吉識会長の記事内容に関して、ある会員から問い合わせがありました。この記事では「大型発電設備では、出力が寸法の3乗に比例する・・・」となっているが2乗の間違いではないかというのが、問い合わせの内容でした。編集委員会委員および関連の方々との議論を通じ、この問題が単純な問題でありながら奥の深い面白い問題であることが分かりましたので、本稿を借りて解説を加えることにいたします。

一般に、原動機の出力は、

$$(\text{出力}) = (\text{力}) \times (\text{力の方向の速度})$$

あるいは

$$(\text{出力}) = (\text{トルク}) \times (\text{角速度})$$

で与えられます。ガスタービンのようなターボ機械の場合、後者の方がよく用いられていますので、以下では、この関係を用いて、出力と寸法との関係を考察することとします。

羽根車にかかるトルクは、角運動量すなわち運動量のモーメントに比例します。したがって、

$$(\text{トルク}) \propto (\text{角運動量}) = (\text{運動量}) \times (\text{半径})$$

ここで、運動量は質量流量と流速の積で与えられ、質量流量は流路面積と流速と密度の積で与えられるため、密度変化が小さいとすると、次式が成り立ちます。

$$(\text{運動量}) = (\text{質量流量}) \times (\text{流速}) \propto (\text{面積}) \times (\text{流速})^2$$

しかし、ターボ機械では流速が大きく変えられないため、運動量は質量流量すなわち流路面積に比例し、寸法の2乗に比例することになります。

$$(\text{運動量}) = (\text{質量流量}) \times (\text{流速}) \propto (\text{面積}) \times (\text{流速})^2 \propto (\text{面積})$$

この関係から、結局、

$$(\text{トルク}) \propto (\text{角運動量}) = (\text{運動量}) \times (\text{半径}) \propto (\text{面積}) \times (\text{半径}) \propto (\text{寸法})^3$$

が得られ、トルクは寸法の3乗に比例することが分かります。

したがって、出力と寸法の間には、

$$(\text{出力}) = (\text{トルク}) \times (\text{角速度}) \propto (\text{寸法})^3 \times (\text{角速度}) \propto (\text{寸法})^3$$

という関係が成り立つことになります。

以上により、原理的には、ターボ機械の出力は寸法の3乗に比例することになります。

一方、実際の大型発電用ガスタービンの設計では、材料の強度面からの制約が生じます。動翼やローターディスクの材料を決めると許容される遠心応力、したがって周速度の上限が決まってしまう。このため、実際の設計では、寸法を変えても周速度(すなわち、半径×角速度)をほぼ一定とせざるを得ません。この制約を考慮して出力を考えると、

$$\begin{aligned} (\text{出力}) &= (\text{トルク}) \times (\text{角速度}) \propto (\text{面積}) \times (\text{半径}) \times (\text{角速度}) \\ &\propto (\text{面積}) \times (\text{周速度}) \\ &\propto (\text{面積}) \\ &\propto (\text{寸法})^2 \end{aligned}$$

となり、出力が寸法の2乗に比例することになります。

以上の考察により、「ガスタービンの出力は、原理上、寸法の3乗に比例するが、大型ガスタービン設計においては材料強度の面から寸法の2乗に比例する」と考えることができます。出力が寸法の2乗に比例することは大型発電用ガスタービン設計者の常識となっていますが、材料強度面の制約の弱い小型ガスタービンでは、出力が寸法の3乗に比例した設計が行われています。特に、出力が面積で決まる(寸法の2乗に比例する)熱交換器、燃料電池や太陽電池などと比較し、小型で大出力となるガスタービンの特長を理解することは肝要です。

この問題は、自分の守備範囲における常識を闇雲に信じるのではなく、その裏にある原理を理解することの重要性を気づかせてくれる良い例題でした。(以上)

## 第14回ガスタービン教育シンポジウム報告

吉田 征二\*1  
YOSHIDA Seiji

2007年7月5日(木)、6日(金)の2日間にわたり、「第14回ガスタービン教育シンポジウム」が東京都調布市の独立行政法人宇宙航空研究開発機構(JAXA)航空宇宙技術研究センターにて開催された。昨年度から関東での開催とは別に関西でも隔年で開催されているが、今年度は関東のみでの開催の年に当たる。参加募集の開始直後の応募者が少なく参加者の大幅な減少が心配されたが、最終的には定員に近い78名(学生51名、社会人27名)の参加者があり、昨年度と比較すると社会人の参加者は同数、学生の参加者は約20名の増加であった。

本シンポジウムは、主にガスタービンの初心者を対象に、ガスタービンの基礎知識を学んで頂く目的で、第一線で活躍されている各専門家による講義と、実際のガスタービンとその関連の製造及び研究開発施設等の見学を併せた企画であり、今年度も1日目に講義2テーマと特別講義(JAXAにおける航空用エンジン研究)及び航空宇宙技術研究設備の見学会を実施し、2日目に講義4テーマを実施した。

1日目は、企画委員会の久松暢委員長による開会の挨拶の後、午前中に(1)ガスタービン概論(二村尚夫氏)の講義が行われ、昼食後、(2)ガスタービンと流体工学(濱崎浩志氏)、JAXAにおける航空用エンジン研究(林茂氏)について講義が行われた。その後、4班に分れて設備見学を行った。ガスタービン関連の研究設備としては小型超音速エンジンを高空状態で運転試験が出来る超音速エンジン運転施設と、アニュラ型燃焼器を実温実圧で燃焼試験ができる環状燃焼器試験設備(写真)を見学し、ガスタービン以外の研究施設としては大型低速風洞と大型三次元表示装置を見学した。研究施設見学後、展示室においてJAXAの研究全般について見学した。

施設見学終了後、JAXA航空宇宙技術研究センター内

の厚生棟で懇親会が開催された。懇親会にはシンポジウム参加者の約6割の方が出席し、1日目の講師の先生方だけでなく2日目の講師2名と教材作成委員会の吉田委員長にも出席いただいた。会場の各所で議論の輪が出来、真剣な議論や相互交流がなされ、時間いっぱいまで有意義な交流が行われた。

2日目は、前日に引き続きガスタービン関連の4テーマの講義、(3)ガスタービンと伝熱工学(船崎健一氏)、(4)ガスタービンと燃焼工学(藤秀実氏)、(5)ガスタービンと材料工学(吉岡洋明氏)、(6)ガスタービンと制御工学(新村栄一氏)が行われた。

講義はガスタービンの基礎に加えて最新の技術動向についても専門家の立場からの説明が有り、受講者にとっては内容の濃い講義であったが、皆熱心に聴講して頂いた。全講義終了後、2日間受講された方に受講修了証が発行された。また、参加者には今後の当シンポジウムの運営及び教材に関するアンケートに御協力頂いた。アンケート集計結果は次回以降の企画及び教材の改訂に反映する予定である。

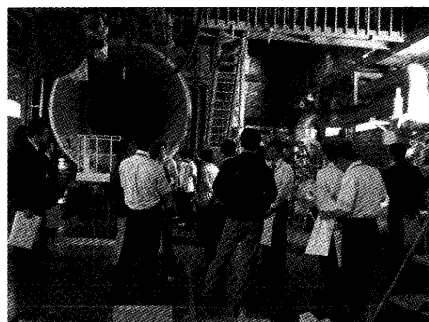
本シンポジウムでは、「ガスタービン技術継続教育教材作成委員会」で編集された書籍を教材として用い、その執筆者の先生方を中心に講師をお願いしている。時間の関係もあり今回の講義では教材の中の基礎編のみを扱ったが、教材には応用編や練習問題も含まれているので、参加された皆様にはこれらを有効に活用し、ガスタービンの知識を深めるのに役立てて頂ければ幸いである。

最後に、講義、資料等の準備に貴重な時間をさいて頂いた講師の先生方に感謝すると共に、会場の提供、見学会及び懇親会についてご協力を頂いた独立行政法人宇宙航空研究開発機構の関係者各位に深く感謝いたします。

(企画委員)



講義風景



施設見学の様子



懇親会風景

## ◇2007年国際ガスタービン会議東京大会のお知らせ◇

国際会議実行委員会  
同 委 員 長

大田 英輔

2003年にタワーホール船堀で前回の国際会議IGTC'03を開催してから早くも3年半あまりの月日がたちました。今回も前回以上の成功となることを目指して、組織委員会や多くの会員の皆様からの後押しにより、下記の通りに12月2日～7日の国際会議開催に向けて着々と準備をすすめてまいりました。2003年に引き続き米国機械学会ガスタービン部門(ASME/IGTI)、日本機械学会、日本航空宇宙学会、および中国、韓国、英国、フランス、ドイツ、イタリア等世界各国の関連学協会の協力を得ており、充実した国際会議となることを確信しております。すでに世界各国からの160件余りの論文発表の申し込みがあり、校閲を進めているところです。また、著名な研究者、技術者による6件のKeynote Speechやアジアのエネルギー事情に関する国際フォーラム、パネルディスカッションが企画されています。さらに、従来の国際会議同様に、ガスタービン関連の最新技術をご覧いただける展示会も同時に開催されます。

最新のガスタービン関連の研究成果を収集し、世界各国の専門家と情報交換が出来る絶好の機会ですので、是非ともご参加くださいますようお願い申し上げます。

## 1. 論文投稿と講演会準備の状況

これまでに164編の講演申し込みがあり、現在は提出されたFull-length Paperの査読をほぼ終え、査読コメントを反映させたFinal Paperの執筆を著者に依頼しているところです。

全体の論文数としては表1のように前回よりやや減少しましたが、提出された論文は前回とほぼ同様の分野をカバーしており、従来比較的手薄だった材料・燃焼分野の論文が充実しています。まだ査読中の論文もあり講演プログラムは確定しておりませんが、今のところ表2のようなセッション構成で準備を進めております。

論文講演以外では、産業GT開発、航空GT開発、材料、空力、運用の各分野でKeynote Speechを依頼しているほか、教育分野でのInvited Lectureも予定しています。パネルディスカッションのテーマには「ガスタービンは環境問題にどう貢献できるか」を取り上げ、日米欧の産官学からパネリストを招いて、少し広い視点でガスタービンの将来像を議論していただく予定です。このほか、前回好評だった「アジア各国のエネルギー事情」を再びForumテーマとして取り上げ、前回以降の情勢の変化についても情報の共有を図ります。

多くの国から優れた論文が集まり、また、種々の情報交換や討論のセッションが実施されることで、参加の意義のある、充実した講演会になるよう鋭意計画を進めており、会員の皆様にもご協力、ご参加と活発なご討論をお願いいたします。なお、講演プログラム等の最新情報は、逐次ホームページに掲載して行く予定ですので、ご注目頂けると幸いです。

表1 国別・分野別の論文応募件数

国名	IGTC'07	IGTC'03	分野	IGTC'07	IGTC'03
Belgium	1	1	開発	19	15
Canada	1	-	空力	52	53
China	6	8	構造・振動	5	10
France	1	3	材料	19	12
Germany	5	13	信頼性	3	1
India	1	5	制御	2	9
Iran	1	6	性能	13	17
Iraq	1	-	伝熱	16	19
Italy	7	4	燃焼	30	23
Japan	104	90	運用	4	-
Korea	5	9	計測	2	-
Mexico	-	1	UMGT	-	8
Netherlands	1	-	Wave Rotor	-	3

Poland	2	2
Russia	9	7
Sweden	1	1
Switzerland	-	2
United Kingdom	10	13
USA	6	10
Saudi Arabia	1	-
Morocco	1	-
国内	104	90
海外	60	85
合計	164	175

船用	-	4
その他	-	1

表2 論文講演のセッション構成案

New Materials and Processes	Aeromechanics
Environmental Coating Degradations	Noise
TBCs and Ceramics	Component Performance
Materials Degradation and Evaluation	Centrifugal Compressor & Radial Turbines
Power Plant	CFD in Gas Turbines
Novel Cycles	Axial Flow Compressor and Fans
Modeling / Dynamic Simulation	Axial Flow Turbines
Film Cooling	Secondary Air and Sealing
Integrated Cooling Structure / Cooling Blade	Icing / Condensation
Impingement Cooling	Control & Instrumentation
External Heat Transfer	Combustor Modeling and Numerical Simulations
Repair Technology	Atomization and Emissions
Operation	Combustor Development
Rotor Dynamics	Combustor Flowfields & Instability
Product Development - I	Combustor Development for Small Aircraft Engines
Product Development - II	Micro Gas Turbine Combustion
Microturbines and Small Turbomachinery	Fuel Flexibility

## 2. 展示会準備状況

国際会議のもう一つの柱であるのが同時に開催される展示会で、展示委員会のもと準備をすすめております。出展社の募集を昨年10月に始め、おかげさまで本年6月で予定のブース数を上回る申込を頂きましたので、すでに募集を締切っております。関係各位のご協力に感謝いたします。なお、展示会において最新のガスタービンおよび関連技術をご覧戴けます様に関係各位の引き続いてのご協力をお願いいたしますとともに、多くの方々のご来場をお待ちいたします。

## 展示会概要

開催期間：2007年12月3日(月)～6日(木)

10：00～18：00（但し3日は12：00開始，6日は9：00開始，14：00終了）

会 場：京王プラザホテル（東京/新宿）本館4階 花の間及びホワイトエ

会場面積：約1100m<sup>2</sup>

小 間 数：72小間

出展社数：39社

展示内容：ガスタービン及びターボ過給機，関連機器・部品・部材，工作機器，  
計測・データ処理機器・試験器，コンピュータ・関連ソフト，出版物等

展示会入場料：無料

## 3. 関連行事

2007年国際ガスタービン会議東京大会では，参加登録された方を対象に，会期中，下記の行事を予定しておりますので，振るってご参加下さい。なお詳細はホームページをご参照下さい。

- ・ウェルカム・レセプション（12月2日(日)夕刻，参加登録者は無料）
- ・バンケット（12月5日(木)夕刻）12,000円
- ・見学会（12月7日(金)）：各コースとも7,000円
  - A) 首都圏外郭放水路庄和排水機場，及び，物質・材料研究機構
  - B) コンバインドサイクル火力発電所

## 4. 講演会・展示会場へのアクセス

本国際会議が開催される京王プラザホテルは，新宿駅西口の高層ビル街に位置しており，交通の便も非常に良い所です。講演会場・展示会場ともに同じホテル内にありますので，行き来は容易です。また一部のセッションルームは高層階を予定しておりますので，新都心の街並みも一望できます。

## 5. 参加登録などの詳細情報

国際会議ホームページでは，講演プログラム（概略），オンライン参加登録の方法などに関する詳細情報をご覧いただけます。オンライン参加登録に問題がございましたら，FAXによる申し込みも受け付けておりますので，登録用紙をホームページからダウンロードするか，学会事務局にご請求下さい。参加登録料の早期割引料金は10月12日までとなっておりますので，是非とも早めにお申し込み下さい。

事前参加登録料：55,000円（当学会，共催・協力学協会会員料金）

65,000円（一般）

15,000円（学生）

10月13日以降は，一般，会員の登録料は+5,000円

なお，日本国内から参加登録される方は，原則として参加登録費の銀行振込または請求書払いにご協力くださいますよう，お願い致します。請求書払いの手順につきましても，国際会議ホームページをご参照下さい。お手数をおかけいたしますが，中間経費節約にご協力をお願い致します。

国際会議ホームページのアドレス

[http://wwwsoc.nii.ac.jp/gtsj/igtc/IGTC07/index\\_e.html](http://wwwsoc.nii.ac.jp/gtsj/igtc/IGTC07/index_e.html)

請求書払いの手順

<http://wwwsoc.nii.ac.jp/gtsj/igtc/IGTC07/IGTC07registrationJP.htm>

## 日本ガスタービン学会賞候補募集のお知らせ

応募締切日：2007年11月30日(金)

日本ガスタービン学会では、下記の趣旨により2年毎に学会賞（論文賞、技術賞および奨励賞）の贈呈を行っております。つきましては、今年度も下記要領により第14回目の学会賞の募集を行うこととなりましたので、お知らせ致します。

## 募集要領

## 1. 日本ガスタービン学会賞の趣旨

本会はガスタービンおよび過給機に関連する工学および技術の発展を奨励することを目的として、優れた論文、技術ならびに新進会員個人の業績に対して、それぞれ日本ガスタービン学会論文賞、技術賞、奨励賞を贈り、表彰を行う。

## 2. 対象となる業績

- (1) 論文賞 日本ガスタービン学会誌および日本ガスタービン学会英文電子ジャーナルに2003年12月以降2007年11月迄に公表された論文で、独創性があり工学および技術に寄与したもの。
- (2) 技術賞 ガスタービンおよび過給機に関連し、同上期間に完成した新技術（画期的な新製品の開発、製品の品質または性能の向上あるいは生産性の向上、材料開発、制御計測および保守技術の向上等）に寄与したもの。
- (3) 奨励賞 日本ガスタービン学会誌および日本ガスタービン学会英文電子ジャーナルに2003年12月以降2007年11月迄に公表された独創的な論文（いずれも本人が中心的役割を果たしたもの）。なお、萌芽的研究も対象とする。

## 3. 受賞者の資格

- (1) 論文賞 受賞者は本会会員（正会員、学生会員）とする。
- (2) 技術賞 受賞者は本会会員（正会員、学生会員、賛助会員）とする。
- (3) 奨励賞 受賞者は本会会員（正会員、学生会員）で、1972年4月2日以降生まれの個人とする。ただし、論文賞、技術賞あるいは奨励賞をすでに受けた者および今年度の論文賞、技術賞内定者は奨励賞を受けることはできない。

4. 受賞件数 論文賞2件、技術賞2件、奨励賞2名程度とする。

5. 表彰の方法 審査の上、表彰状および賞牌を授与する。

6. 表彰の時期 表彰は、2008年4月開催予定の日本ガスタービン学会総会において行う。

7. 応募の方法 公募によるものとし、論文賞、技術賞は推薦または本人より申請、奨励賞は推薦による。なお、一度申請して受賞しなかったものでも、再度応募して差し支えない。

8. 提出書類 推薦または申請には、本会の所定用紙に必要事項を記載して、1件につき正1通、副2通（コピーで可）の計3通を提出する。

9. 提出締切日 2007年11月30日(金)17時必着

10. 提出先 〒160-0023 東京都新宿区西新宿7-5-13  
第3工新ビル402  
㈱日本ガスタービン学会  
表彰委員会宛



## ○本会共催・協賛・行事○

主催学協会	会合名	開催日・会場		詳細問合せ先
日本機械学会 関西支部	ステップアップ・セミナー 2007「わが国企業・技術 者・学生のための戦略的技 術経営Ⅱ -グローバル展開 を視野に入れた戦略事例-」	H19/11/12 建設交流館	協賛	日本機械学会関西支部 TEL06-6443-2073 FAX06-6443-6049 E-MAIL:jsme@soleil.ocn.ne.jp
日本機械学会	基礎教育講習会 -エンジン における実験・計測の基礎 と応用 (その16)	H19/11/26 日本機械学会会議室	協賛	日本機械学会 事務局 URL: <a href="http://www.jsme.or.jp/kousyu2.htm">http://www.jsme.or.jp/ kousyu2.htm</a>
日本燃焼学会	第45回燃焼シンポジウム	H19/12/05-07 仙台国際センター 会議場	共催	第45回燃焼シンポジウム事務局 URL: <a href="http://www.combustion&lt;br/&gt;society.jp/sympo45">http://www.combustion society.jp/sympo45</a>
日本液体微粒化学 会	第16回微粒化シンポジウム	H19/12/20-21 大阪大学 吹田キャンパス コンベンションセンター	協賛	日本液体微粒化学会 <a href="http://www.ilass-japan.gr.jp">http://www.ilass-japan.gr.jp</a>



今年の夏には、40度を越す記録的な猛暑が一部の地域で観測されましたが、すでにこの暑さは峠を超え、これから本格的な台風シーズンとなる9月がやってまいりました。

今月号の特集記事では、「トライボロジー (tribology)」を取り上げました。「トライボロジー」という言葉は、ギリシア語で「摩擦」を意味する“τριβος (tribos)”を語源とする造語で、約40年前のイギリスの報告書に記載されたのが最初だそうです。学問的には、相対運動しながら影響を及ぼしあう表面のメカニズムを扱う分野を意味し、日本語の、摩擦・摩耗・潤滑を包含するも、より幅広い意味をもっています。

雨の日に靴が滑り、車をブレーキで停止させるなど、トライボロジーは身近に存在し、ガスタービンにおいても、性能や信頼性面での重要な技術となっています。シールからの漏れ空気や軸受の損失が低減できれば性能が向上します。部品の摩耗が減少すれば寿命が改善されます。減速歯車装置や軸受等の潤滑が強化され負荷能力が高くなれば、より大きな動力が伝達され大容量化が可能になります。

まず、基本的な原理の紹介として、トライボロジーを扱う機械要素開発者の観点からトライボロジー入門の記事をお願いしました。トライボロジーとは、独立した分野ではなく、流体・熱・材料・構造・強度・振動・化学の各分野の集大成であることがわかります。特別に分野が分かれているのは、扱う表面の形状(凹凸)に無限の可能性が存在することに起因すると思われれます。

次に、理論面にあまり深く入り込むと、ガスタービン技術者の多くの方は興味がなくなるのではと思い、応用技術とし

て、信頼性(耐摩耗)の観点から材料やコーティング、性能と関係深い要素として、軸受、メカニカルシール、非接触シール、大容量減速装置を取り上げました。多くの分野の読者に役立てていただければ幸いです。

ところで、今月号では“ガスタービンの出力は寸法の2乗に比例するのか、3乗に比例するのか?”というユニークな解説も取り上げましたので、ご一読ください。

最後になりますが、本号刊行にあたり、執筆者の方々にはお忙しい中、急な原稿依頼に対して快くお引き受けいただきありがとうございました。編集委員一同、こころよりお礼申し上げます。なお、本号の企画編集は、加藤委員(東京大学)、佐々木委員(IHIエアロスペース)、平田委員(IHI)、そして、青山(三菱重工業:第31期理事)、園田(本田技術研究所:第32期理事)が担当しました。

<表紙写真>

樹脂軸受の変速機への組み込み例

この写真は株式会社日立製作所GTDセンターの試験設備のガスタービン駆動変速機に樹脂軸受を搭載したものである。(17000kW 7281min<sup>-1</sup>)

樹脂軸受の採用により高面化、更に軸受の機能として必要のない部分を切り欠いた部分軸受を採用することで軸受損失を低減させた。

(提供:株式会社日立ニコトランスミッション)

だより  
事務局

会員の皆様は既にご存知のことと思いますが、名実ともに学会事務局の顔であった事務局長の三浦敦子さんが本年6月末で定年退職されました。何しろ35年間のキャリアの人が抜けたあとですから、引き続き今までと同じようなサービスを皆様にご提供できるかどうか不安なところもありますが、事務局一丸となって新たな事務局体制の再構築に向け懸命に努力をしているところであります。会員の皆様のご理解をいただければ幸いに存じます。

申し遅れましたが、事務局長を引き継ぎました伊藤高根と申します。今まで、学会の活動につきましては、評議員、理

事、各委員会委員などの経験は多少ありましたが、事務局の立場での経験は初めてであります。実務となると毎日が初体験の連続で、多少ともほげ防止にもなることを期待しながら、ただいま週2.5日の勤務を悪戦苦闘中というところであります。体制が整い次第、後任にバトンタッチをし、老兵は早く消えるべきと心得ております。

なお、この欄は今後、事務局の中村さん、高田さんとともに3人の持ち回りで進めさせていただきますのでよろしくお願いたします。

[伊藤]

今年の夏には、40度を越す記録的な猛暑が一部の地域で観測されましたが、すでにこの暑さは峠を超え、これから本格的な台風シーズンとなる9月がやってまいりました。

今月号の特集記事では、「トライボロジー (tribology)」を取り上げました。「トライボロジー」という言葉は、ギリシア語で「摩擦」を意味する“τριβος (tribos)”を語源とする造語で、約40年前のイギリスの報告書に記載されたのが最初だそうです。学問的には、相対運動しながら影響を及ぼしあう表面のメカニズムを扱う分野を意味し、日本語の、摩擦・摩耗・潤滑を包含するも、より幅広い意味をもっています。

雨の日に靴が滑り、車をブレーキで停止させるなど、トライボロジーは身近に存在し、ガスタービンにおいても、性能や信頼性面での重要な技術となっています。シールからの漏れ空気や軸受の損失が低減できれば性能が向上します。部品の摩耗が減少すれば寿命が改善されます。減速歯車装置や軸受等の潤滑が強化され負荷能力が高くなれば、より大きな動力が伝達され大容量化が可能になります。

まず、基本的な原理の紹介として、トライボロジーを扱う機械要素開発者の観点からトライボロジー入門の記事をお願いしました。トライボロジーとは、独立した分野ではなく、流体・熱・材料・構造・強度・振動・化学の各分野の集大成であることがわかります。特別に分野が分かれているのは、扱う表面の形状(凹凸)に無限の可能性が存在することに起因すると思われれます。

次に、理論面にあまり深く入り込むと、ガスタービン技術者の多くの方は興味がなくなるのではと思い、応用技術とし

て、信頼性(耐摩耗)の観点から材料やコーティング、性能と関係深い要素として、軸受、メカニカルシール、非接触シール、大容量減速装置を取り上げました。多くの分野の読者に役立てていただければ幸いです。

ところで、今月号では“ガスタービンの出力は寸法の2乗に比例するのか、3乗に比例するのか?”というユニークな解説も取り上げましたので、ご一読ください。

最後になりますが、本号刊行にあたり、執筆者の方々にはお忙しい中、急な原稿依頼に対して快くお引き受けいただきありがとうございました。編集委員一同、こころよりお礼申し上げます。なお、本号の企画編集は、加藤委員(東京大学)、佐々木委員(IHIエアロスペース)、平田委員(IHI)、そして、青山(三菱重工業:第31期理事)、園田(本田技術研究所:第32期理事)が担当しました。

<表紙写真>

樹脂軸受の変速機への組み込み例

この写真は株式会社日立製作所GTDセンターの試験設備のガスタービン駆動変速機に樹脂軸受を搭載したものである。(17000kW 7281min<sup>-1</sup>)

樹脂軸受の採用により高面化、更に軸受の機能として必要のない部分を切り欠いた部分軸受を採用することで軸受損失を低減させた。

(提供:株式会社日立ニコトランスミッション)

だより

♣事務局

会員の皆様は既にご存知のことと思いますが、名実ともに学会事務局の顔であった事務局長の三浦敦子さんが本年6月末で定年退職されました。何しろ35年間のキャリアの人が抜けたあとですから、引き続き今までと同じようなサービスを皆様にご提供できるかどうか不安なところもありますが、事務局一丸となって新たな事務局体制の再構築に向け懸命に努力をしているところであります。会員の皆様のご理解をいただければ幸いに存じます。

申し遅れましたが、事務局長を引き継ぎました伊藤高根と申します。今まで、学会の活動につきましては、評議員、理

事、各委員会委員などの経験は多少ありましたが、事務局の立場での経験は初めてであります。実務となると毎日が初体験の連続で、多少ともほげ防止にもなることを期待しながら、ただいま週2.5日の勤務を悪戦苦闘中というところであります。体制が整い次第、後任にバトンタッチをし、老兵は早く消えるべきと心得ております。

なお、この欄は今後、事務局の中村さん、高田さんとともに3人の持ち回りで進めさせていただきますのでよろしくお願いたします。

[伊藤]

今年の夏には、40度を越す記録的な猛暑が一部の地域で観測されましたが、すでにこの暑さは峠を超え、これから本格的な台風シーズンとなる9月がやってまいりました。

今月号の特集記事では、「トライボロジー (tribology)」を取り上げました。「トライボロジー」という言葉は、ギリシア語で「摩擦」を意味する“τριβος (tribos)”を語源とする造語で、約40年前のイギリスの報告書に記載されたのが最初だそうです。学問的には、相対運動しながら影響を及ぼしあう表面のメカニズムを扱う分野を意味し、日本語の、摩擦・摩耗・潤滑を包含するも、より幅広い意味をもっています。

雨の日に靴が滑り、車をブレーキで停止させるなど、トライボロジーは身近に存在し、ガスタービンにおいても、性能や信頼性面での重要な技術となっています。シールからの漏れ空気や軸受の損失が低減できれば性能が向上します。部品の摩耗が減少すれば寿命が改善されます。減速歯車装置や軸受等の潤滑が強化され負荷能力が高くなれば、より大きな動力が伝達され大容量化が可能になります。

まず、基本的な原理の紹介として、トライボロジーを扱う機械要素開発者の観点からトライボロジー入門の記事をお願いしました。トライボロジーとは、独立した分野ではなく、流体・熱・材料・構造・強度・振動・化学の各分野の集大成であることがわかります。特別に分野が分かれているのは、扱う表面の形状(凹凸)に無限の可能性が存在することに起因すると思われれます。

次に、理論面にあまり深く入り込むと、ガスタービン技術者の多くの方は興味がなくなるのではと思い、応用技術とし

て、信頼性(耐摩耗)の観点から材料やコーティング、性能と関係深い要素として、軸受、メカニカルシール、非接触シール、大容量減速装置を取り上げました。多くの分野の読者に役立てていただければ幸いです。

ところで、今月号では“ガスタービンの出力は寸法の2乗に比例するのか、3乗に比例するのか?”というユニークな解説も取り上げましたので、ご一読ください。

最後になりますが、本号刊行にあたり、執筆者の方々にはお忙しい中、急な原稿依頼に対して快くお引き受けいただきありがとうございました。編集委員一同、こころよりお礼申し上げます。なお、本号の企画編集は、加藤委員(東京大学)、佐々木委員(IHIエアロスペース)、平田委員(IHI)、そして、青山(三菱重工業:第31期理事)、園田(本田技術研究所:第32期理事)が担当しました。

<表紙写真>

樹脂軸受の変速機への組み込み例

この写真は株式会社日立製作所GTDセンターの試験設備のガスタービン駆動変速機に樹脂軸受を搭載したものである。(17000kW 7281min<sup>-1</sup>)

樹脂軸受の採用により高面化、更に軸受の機能として必要のない部分を切り欠いた部分軸受を採用することで軸受損失を低減させた。

(提供:株式会社日立ニコトランスミッション)

だより

♣事務局

会員の皆様は既にご存知のことと思いますが、名実ともに学会事務局の顔であった事務局長の三浦敦子さんが本年6月末で定年退職されました。何しろ35年間のキャリアの人が抜けたあとですから、引き続き今までと同じようなサービスを皆様にご提供できるかどうか不安なところもありますが、事務局一丸となって新たな事務局体制の再構築に向け懸命に努力をしているところであります。会員の皆様のご理解をいただければ幸いに存じます。

申し遅れましたが、事務局長を引き継ぎました伊藤高根と申します。今まで、学会の活動につきましては、評議員、理

事、各委員会委員などの経験は多少ありましたが、事務局の立場での経験は初めてであります。実務となると毎日が初体験の連続で、多少ともほげ防止にもなることを期待しながら、ただいま週2.5日の勤務を悪戦苦闘中というところであります。体制が整い次第、後任にバトンタッチをし、老兵は早く消えるべきと心得ております。

なお、この欄は今後、事務局の中村さん、高田さんとともに3人の持ち回りで進めさせていただきますのでよろしくお願いたします。

[伊藤]

## 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
情報欄記事	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定を定める。

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、当該著作者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. 03-5733-5157 Fax. 03-5733-5168  
ニッセイエブプロ(株) 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

2005.12.8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。ただし、第一著者が日本語による論文執筆が困難な場合、および本学会主催の国際会議で発表した論文は英語による投稿を認める。なお、原稿執筆は日本語の場合に準拠するものとする。

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.35 No.5 2007.9

発行日 2007年9月20日  
発行所 社団法人日本ガスタービン学会  
編集者 山本 誠  
発行者 吉識晴夫  
〒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  
(普)1703707  
印刷所 ニッセイエブプロ(株)  
〒105-0004 東京都港区新橋5-20-4  
Tel. 03-5733-5157 Fax. 03-5733-5168

©2007, (株)日本ガスタービン学会

#### 複写される方へ

本会は下記協会に複写に関する権利委託をしていますので、本誌に掲載された著作物を複写したい方は、同協会より許諾を受けて複写して下さい。但し(株)日本複写権センター(同協会より権利を再委託)と包括複写許諾契約を締結されている企業の社員による社内利用目的の複写はその必要はありません。(社外頒布用の複写は許諾が必要です)

権利委託先:(中法)学術著作権協会  
〒107-0052 東京都港区赤坂9-6-41 乃木坂ビル  
電話(03)3475-5618 FAX(03)3475-5619  
E-mail: info@jaacc.jp

なお、著作物の転載・翻訳のような、複写以外の許諾は、学術著作権協会では扱っていませんので、直接日本ガスタービン学会へご連絡下さい。また、アメリカ合衆国において本書を複写したい場合は、次の団体に連絡して下さい。

Copyright Clearance Center, Inc.  
222 Rosewood Drive, Danvers, MA01923 USA  
Phone 1-978-750-8400 FAX 1-978-646-8600

## 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
情報欄記事	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定を定める。

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、当該著作者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. 03-5733-5157 Fax. 03-5733-5168  
ニッセイエブプロ(株)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

2005.12.8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。ただし、第一著者が日本語による論文執筆が困難な場合、および本学会主催の国際会議で発表した論文は英語による投稿を認める。なお、原稿執筆は日本語の場合に準拠するものとする。

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.35 No.5 2007.9

発行日 2007年9月20日  
発行所 社団法人日本ガスタービン学会  
編集者 山本 誠  
発行者 吉識晴夫  
〒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  
(普)1703707  
印刷所 ニッセイエブプロ(株)  
〒105-0004 東京都港区新橋5-20-4  
Tel. 03-5733-5157 Fax. 03-5733-5168

©2007, (株)日本ガスタービン学会

#### 複写される方へ

本会は下記協会に複写に関する権利委託をしていますので、本誌に掲載された著作物を複写したい方は、同協会より許諾を受けて複写して下さい。但し(株)日本複写権センター(同協会より権利を再委託)と包括複写許諾契約を締結されている企業の社員による社内利用目的の複写はその必要はありません。(社外頒布用の複写は許諾が必要です)

権利委託先:(中法)学術著作権協会  
〒107-0052 東京都港区赤坂9-6-41 乃木坂ビル  
電話(03)3475-5618 FAX(03)3475-5619  
E-mail: info@jaacc.jp

なお、著作物の転載・翻訳のような、複写以外の許諾は、学術著作権協会では扱っていませんので、直接日本ガスタービン学会へご連絡下さい。また、アメリカ合衆国において本書を複写したい場合は、次の団体に連絡して下さい。

Copyright Clearance Center, Inc.  
222 Rosewood Drive, Danvers, MA01923 USA  
Phone 1-978-750-8400 FAX 1-978-646-8600

## 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
情報欄記事	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定を定める。

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、当該著作者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. 03-5733-5157 Fax. 03-5733-5168  
ニッセイエブプロ(株) 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

2005.12.8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。ただし、第一著者が日本語による論文執筆が困難な場合、および本学会主催の国際会議で発表した論文は英語による投稿を認める。なお、原稿執筆は日本語の場合に準拠するものとする。

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.35 No.5 2007.9

発行日 2007年9月20日  
発行所 社団法人日本ガスタービン学会  
編集者 山本 誠  
発行者 吉識晴夫  
〒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  
(普)1703707  
印刷所 ニッセイエブプロ(株)  
〒105-0004 東京都港区新橋5-20-4  
Tel. 03-5733-5157 Fax. 03-5733-5168

©2007, (株)日本ガスタービン学会

#### 複写される方へ

本会は下記協会に複写に関する権利委託をしていますので、本誌に掲載された著作物を複写したい方は、同協会より許諾を受けて複写して下さい。但し(株)日本複写権センター(同協会より権利を再委託)と包括複写許諾契約を締結されている企業の社員による社内利用目的の複写はその必要はありません。(社外頒布用の複写は許諾が必要です)

権利委託先:(中法)学術著作権協会  
〒107-0052 東京都港区赤坂9-6-41 乃木坂ビル  
電話(03)3475-5618 FAX(03)3475-5619  
E-mail: info@jaacc.jp

なお、著作物の転載・翻訳のような、複写以外の許諾は、学術著作権協会では扱っていませんので、直接日本ガスタービン学会へご連絡下さい。また、アメリカ合衆国において本書を複写したい場合は、次の団体に連絡して下さい。

Copyright Clearance Center, Inc.  
222 Rosewood Drive, Danvers, MA01923 USA  
Phone 1-978-750-8400 FAX 1-978-646-8600

## 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
情報欄記事	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定を定める。

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、当該著作者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. 03-5733-5157 Fax. 03-5733-5168  
ニッセイエブプロ(株) 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

2005.12.8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。ただし、第一著者が日本語による論文執筆が困難な場合、および本学会主催の国際会議で発表した論文は英語による投稿を認める。なお、原稿執筆は日本語の場合に準拠するものとする。

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.35 No.5 2007.9

発行日 2007年9月20日  
発行所 社団法人日本ガスタービン学会  
編集者 山本 誠  
発行者 吉識晴夫  
〒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  
(普)1703707  
印刷所 ニッセイエブプロ(株)  
〒105-0004 東京都港区新橋5-20-4  
Tel. 03-5733-5157 Fax. 03-5733-5168

©2007, (株)日本ガスタービン学会

#### 複写される方へ

本会は下記協会に複写に関する権利委託をしていますので、本誌に掲載された著作物を複写したい方は、同協会より許諾を受けて複写して下さい。但し(株)日本複写権センター(同協会より権利を再委託)と包括複写許諾契約を締結されている企業の社員による社内利用目的の複写はその必要はありません。(社外頒布用の複写は許諾が必要です)

権利委託先: (中法) 学術著作権協会  
〒107-0052 東京都港区赤坂9-6-41 乃木坂ビル  
電話(03)3475-5618 FAX(03)3475-5619  
E-mail: info@jaacc.jp

なお、著作物の転載・翻訳のような、複写以外の許諾は、学術著作権協会では扱っていませんので、直接日本ガスタービン学会へご連絡下さい。また、アメリカ合衆国において本書を複写したい場合は、次の団体に連絡して下さい。

Copyright Clearance Center, Inc.  
222 Rosewood Drive, Danvers, MA01923 USA  
Phone 1-978-750-8400 FAX 1-978-646-8600