耐熱コーティングの開発動向と性能評価試験方法の標準化

伊藤 義康*, 和田 国彦*

* (株)東芝 電力・社会システム技術開発センター(〒230-0045 神奈川県横浜市鶴見区末広町2-4)

Present Status of Heat-Resistant Coatings and Standardization Trend
for Their Evaluation and Testing Methods

Yoshiyasu ITOH* and Kunihiko WADA*

*Power and Industrial Systems R&D Center, Toshiba Corporation(2-4, Suehiro-cho, Tsurumi-ku, Yokohama-shi, Kanagawa 230-0045)

Keywords: Heat-Resistant Coating, Corrosion and Oxidation Resistant Coating, Standardization, Testing Method, Thermal Barrier Coating, Gas Turbine

1. はじめに

昨年、国際溶射会議(ITSC 2007)が中国北京で開催された。図1には、同会議における論文発表傾向をまとめて示す。図中に示す発表分野分類から明らかなように、この会議の特徴は、厚膜を形成するためのコーティング・プロセス開発に関する発表が、全発表件数の70%を占める点にある。その内訳は、従来から継続的に研究開発が進められてきたプラズマ溶射、アーク溶射、減圧プラズマ溶射(LPPS: Low Pressure Plasma Spraying)と、より高速で基材表面に粉末を吹き付けて厚膜を形成する高速ブレード溶射(HVOF: High Velocity Oxygen Fuel)が主体である。最近では、粉末を溶かさずに高速で吹き付けるコールドスプレーが、ち密で密着性に優れた厚膜を形成できることから脚光を浴びていることが発表件数から分かる。また、機能性材料開発におけるナノ構造制御を目的に、原料に前駆体を用いたプリカーサ溶射の

開発も進められている。一方で、“もの作り”が主体の国際溶射会議ではあるが、これを支えるコーティングのミクロ組織、機械的特性、熱的特性、熱サイクル特性、摩耗特性などの特性評価技術に関する論文発表と計算機によるプロセス・シミュレーション技術の発表を合わせて21%を占めている。この割合は、何年もの間大きな変化はないが、継続的に論文発表が行われていることは特筆に価する。すなわち、“もの作り”の進歩を加速し、確実なものとするためには、特性評価とプロセス・シミュレーション技術の開発は非常に重要な役割を担うと考えられるからである。

一方、近年はセラミックやサーメットを用いた耐熱コーティングに関する発表が、全論文発表数の1/3を占め、さらに増加傾向が認められる。材料的には、部分安定化ジルコニア(YSZ: Yttria Partially Stabilized Zirconia)、タングステンカーバイド系サーメット(WC-Co, Cr)、チタニア(TiO_2)、アルミナ(Al_2O_3)に関する論文発表が大部分を占め

図1 国際溶射会議(ITSC 2007)における論文発表傾向

ている。これを機能分類から用途について見ると、YSZ は高温機器であるガスタービンの遮熱コーティング(TBC: Thermal Barrier Coating)、アプレイダブル・コーティング、また固体電解質型燃料電池(SOFC: Solid Oxide Fuel Cell)のセル材料への適用を目指した研究開発が進められている。一方、WC-Co、Cr、 Al_2O_3 は主に高温の耐摩耗・耐食コーティング、 TiO_2 はバイオメディカル、色素増感型太陽電池、光触媒材料としての研究開発が進められている。

以上からも明らかなように、高温機器に使われる耐熱コーティング技術は、その重要度が高く評価されており、この10年間で劇的な進歩を遂げてきた¹⁾。本稿では、ガスタービン耐熱コーティング技術の開発動向の概要について示す。さらに、耐熱コーティング技術の開発において、その重要度が指摘されている性能評価試験方法の開発と規格・標準化動向について紹介する。

2. ガスタービン耐熱コーティング技術の開発動向

近年は、化石燃料の有効利用、環境低負荷、経済性向上の観点から、液化天然ガス(LNG)燃料を用いた火力発電プラントのほとんどがコンバインド・サイクルを構成する傾向にある。すなわち、この20年間における発電用ガスタービンの作動温度の高温化が著しく、蒸気タービンと組み合わせたコンバインド・サイクルとして、発電プラントの高効率化が実現されてきたのである。このようなガスタービンの高温化を実現したのは、高温部材を構成する耐熱超合金の開発と耐熱コーティング技術、さらには冷却技術の進歩である。すなわち、入口ガス温度1100℃級のE型ガスタービン動翼では、多結晶Ni基超合金基材内面を空気冷却し、外面には耐食・耐酸化コーティングが施されている。現在主流の燃焼ガス温度1300℃級のF/FA型ガスタービン動翼では、一方向凝固Ni基超合金基材内面を空気冷却し、動翼表面と冷却孔内面

には耐食・耐酸化コーティングが施されている。また、商用運転を開始した燃焼ガス温度が1500℃級のG/H型ガスタービン動翼では、単結晶Ni基超合金基材内面を蒸気冷却し、冷却孔内面には耐食・耐酸化コーティング、動翼表面にはセラミック遮熱コーティングが施されている。このようにコンバインド・サイクル発電プラントは、大容量化、高効率化を指向して開発が進められてきており、1500℃級コンバインド・サイクルにおいてはプラント発電端出力が394-490 MWA、プラント発電端効率で53%(高位発熱量(HHV)基準)に達している^{1),2)}。

発電用ガスタービン高温部品の耐食・耐酸化コーティング、およびセラミック遮熱コーティングの開発経緯をまとめて図2に示す³⁾。ガスタービンの燃焼器と動静翼とでは、その使用条件の過酷さに大きな差があり、セラミック遮熱コーティングの実機適用時期についても大きく異なることが分かる。ガスタービン燃焼器内面には、比較的早い時期からセラミック遮熱コーティングが施されてきた。すなわち、大気中プラズマ溶射プロセスをベースに種々の積層形態の変遷を経て、現在の2層遮熱コーティングが構築されてきた。すなわち、開発の初期にはNiAl ボンドコート(アンダーコートとも呼ばれている)とCaOあるいはMgO 部分安定化 ZrO_2 トップコート、その中間に熱応力緩和のため両者を混合したサーメット層を配した3層コーティングが開発された。その後、より高温での耐食・耐酸化性に優れたCoCrAlY合金が開発されてボンドコートとして用いられるようになり、さらに熱応力緩和効果を高めるためCoCrAlY ボンドコートとMgO 部分安定化 ZrO_2 トップコート間を段階的に両者の成分比を変化させた漸変コーティング(Graded coating)が開発された。しかし、より優れた耐酸化性と熱サイクル性を追求する中でNiCrAlY、NiCoCrAlY ボンドコートと Y_2O_3 部分安定化 ZrO_2 トップコートが開発され、現在では燃焼器内面に

図2 ガスタービン高温部品への耐熱コーティング技術の開発経緯

は2層からなる遮熱コーティングが大気中プラズマ溶射法により形成されている。

一方、高い信頼性が必要とされるガスタービン動静翼へのセラミック遮熱コーティングの適用は、致命的な損傷を招く可能性もあり慎重に進められた。当初、ガスタービン動翼には高温での耐食・耐酸化を目的としたAl, Crなどの拡散処理, Pt/Alの複合処理が施されていた。その後、電子ビーム物理蒸着法(EB-PVD: Electron Beam Physical Vapor Deposition)によるCoCrAlY, NiCoCrAlY合金などのコーティングが主流となる。また、より量産化に優れた減圧プラズマ溶射によるNiCoCrAlY合金コーティングやCoCrAlY合金コーティングの表面に、Al拡散処理を施した複合処理などが実用化されている。現在では、減圧プラズマ溶射法あるいは高速フレイム溶射法によるNiCoCrAlY合金ボンドコートと、大気中プラズマ溶射法による Y_2O_3 部分安定化 ZrO_2 トップコートで構成される2層遮熱コーティングの適用が主流となっている。この高速フレイム溶射法は燃料と空気(あるいは酸素)の高圧燃焼エネルギーを熱源とし、溶射粒子を600 mm/s以上の高速で基材表面に吹き付けるプロセスである。大気中での溶射プロセスであるにもかかわらず、酸化の影響が少なく密で密着性に優れた皮膜が得られるため、減圧プラズマ溶射の代替としての適用が進められており、経済性の観点からも優れたプロセスである。

また、一部の航空機エンジンやガスタービンの高温部品には、耐エロージョン性、耐熱衝撃性、耐熱サイクル性に優れたセグメンテーション化(皮膜に縦割れを導入する)された Y_2O_3 - ZrO_2 トップコートが、電子ビーム物理蒸着装置により施工されている。一般に、電子ビーム物理蒸着法は真空容

器中でコーティング材料に高出力電子ビームを偏向照射し、コーティング材料を熔融蒸発させて高温に加熱した基材表面に成膜させるプロセスである。

最近では、セラミック遮熱コーティングのトップコートへのセグメンテーション化(縦割れ導入)が、コーティングの耐はく離特性向上に有効であることが注目されている。すなわち、大気中プラズマ溶射に関しても、厚膜 Y_2O_3 部分安定化 ZrO_2 トップコートのセグメンテーション化が進められており⁴⁾、耐熱サイクル性とともな経済性にも優れたセラミック遮熱コーティングの形態として実用化が進められている。

3. 耐熱コーティングの性能評価試験方法

3. 1 試験方法の標準化ロードマップ

ガスタービン高温部品に関する実用化開発の歴史の中で、耐熱コーティング部材の評価試験方法の急速な進歩も特筆すべき事柄である。当初は耐熱超合金の評価に付随して実施されてきた耐熱性試験が、現在では耐熱コーティングの損傷・劣化評価を主目的に評価試験が実施されるようになってきた。このような耐熱コーティングの性能評価試験方法に関しては、世界に先駆けた規格・標準化活動が財大阪科学技術センター附属ニューマテリアルセンターを中心に進められている。

ところで、図3に示すようにガスタービン高温部品の耐熱コーティング技術の開発から実機適用に至るまでの過程は、4つのステップで示される^{1),5)}。すなわち、ガスタービン高温部品などの厳しい環境で使用される耐熱コーティングに関しては、ステップI(コーティング設計)が不可欠である。コーティング設計を実現するためには、コーティングの物性を明らかにし、熱伝導解析や熱応力解析手法を導入する必要

図3 ガスタービン高温部品への耐熱コーティング適用ステップ

がある。これにより、基材とコーティングのマッチングを図り、コーティング材料とその構造、ならびに厚さなどの基本事項を決定することが可能となる。

次に、ステップII(ヒーター加熱材料選択)では、主に長時間加熱によるコーティング材料の耐高温腐食性、あるいは耐高温酸化性を評価することによるコーティング材料の絞込みを行う。この試験に関しては従来から多くの長時間データが蓄積されてきており、最近では耐環境性とともにより基材とコーティングの界面やコーティング層間での長時間加熱による劣化現象を評価することが行われている。このような一様加熱による耐熱コーティング部材の長時間評価試験は簡便ではあるが、実機に比べると熱応力の観点からは厳しい評価となっている。

さらに、より実機条件に近い状態での評価試験としてステップIII(バーナー加熱寿命評価)が行われている。バーナー加熱はヒーター加熱試験に比べると高コストで、一般には長時間試験が困難であった。そのため、短時間でのバーナー加熱による耐熱コーティングの寿命評価試験として実施されてきた経緯がある。しかし、最近ではより簡単なバーナー加熱試験方法が開発され、ステップI、ステップIIで絞り込んだ耐熱コーティングについて、温度勾配下での熱サイクル寿命評価を行うことを主目的に実施される傾向にある。

最後のステップIV(実機検証試験)は、実機のカスタマーに組み込んで行われる耐熱コーティングの寿命検証試験(レインボーローター試験)である。ステップI、ステップII、ステップIIIで絞り込んだ耐熱コーティングについて実機条件

での検証試験を行うことにより、高い信頼性を有する耐熱コーティングの開発が可能となる。

上記の4つのステップは、いずれも重要であることは言うまでもない。図4には、各ステップの耐熱コーティングの性能評価試験方法に関する標準化のロードマップを示す。現状において、標準化はステップIII(バーナー加熱寿命評価)から開始されており、すでに2005年にはJIS H 7851(日本工業規格)が制定され、現在はISO(世界標準)化に向けてNEDOプロジェクトとして活動中である。また、ステップII(ヒーター加熱材料選択)に関しても、2007年にJIS H 8451とJIS H 8452が制定されている。さらに、ステップI(コーティング設計)に関連したコーティング物性評価に関しては、2006年からNEDOプロジェクトが発足しており、コーティングの熱的特性(熱伝導率、熱膨張係数)、機械的特性(ヤング率、曲げ強度、残留応力)の評価試験方法についてJIS化に向けての検討が進められている。以上で示した規格・標準化の具体的な内容について、ステップごとに以下にまとめる。

3. 2 温度勾配下での耐熱性評価試験方法

従来から実施されてきたバーナー加熱試験は、ガスタービン実機の燃焼条件に近づけた雰囲気中に高温部品を曝すことで耐熱性を検証することを目的に実施されてきた。これに対して、温度勾配下での耐熱性評価試験は耐熱コーティング部材の損傷メカニズム解明に主眼を置いて開発されており、高性能材料の開発を主目的としている。このような観点から、セラミック遮熱コーティングのはく離メカニズムの解明が、温度勾配下での耐熱性評価試験により進められている⁶⁾。

図4 耐熱コーティング技術の評価試験方法の標準化ロードマップ

宇宙往還機の機体表面や推進システム用に開発された金属/セラミックス系の熱応力緩和型の傾斜機能材料(FGM: Functionally Graded Material)について、耐熱性を評価する目的で簡易なバーナー加熱試験システムが開発されてきた。すなわち、直径 30 mm の円盤状試験体を用いてバーナーにより表面を加熱し、水冷銅チャンバーで裏面を冷却することで一次元熱流を作り、耐熱性評価を行う燃焼試験方法である⁷⁾。このバーナー加熱試験では、図 5 で示すように評価対象である試験体を銅製のホルダーにろう付けし、ホルダーは水冷銅チャンバー上にはんだ付けで固定されている。試験体の表面温度は燃焼炎による赤外線吸収バンドをフィルタリングした放射温度計により測定し、銅製ホルダーには複数箇所に熱電対を装填して温度計測が行われている。

この耐熱試験方法は 2005 年に JIS H 7851:「温度傾斜場での耐熱試験方法」として規格化されており、温度測定結果から図 4 に示す計算式により熱流速や有効熱伝導率などを算出することが可能である。試験体としてセラミック遮熱コーティングを施した Ni 基超合金基材を用いた場合には、耐熱性評価とともに遮熱コーティングの最重要機能である遮熱特性(有効熱伝導率)を評価することができる。また、バーナー

図 5 温度傾斜場での耐熱試験方法 (JIS H 7851)

図 6 酸化金属コーティングの耐はく離性試験方法 (JIS H 8452)

のノズル前面に水冷銅シャッターを設け、これを開閉することにより熱サイクル試験を可能としている。試験体に生じる損傷検知の高精度化のためには AE センサーを用い、加熱・冷却サイクルによる試験体の損傷発生時期を定量的に把握することが推奨されている。さらに加熱源に関しても、評価対象と評価目的に応じて、バーナー加熱以外にアーク・プラズマ加熱、レーザ・赤外線ランプ加熱などを用いて試験を実施することが規定されている。温度勾配下での耐熱性評価試験方法に関しては 2007 年には NEDO プロジェクトが発足しており、現在、ISO(世界標準)化に向けて国際標準化委員会活動が進められている。

3. 3 熱サイクル・熱衝撃特性評価試験方法

ヒーターによる試験体の均一加熱試験は、最も基本的な耐熱性評価試験方法で長時間加熱が容易であり、金属材料については 1993 年に JIS Z 2281:「金属材料の高温連続酸化試験方法」、1996 年に JIS Z 2282:「金属材料の高温繰返し酸化試験方法」の 2 件が規格化されている。2004 年末には相次いで JIS Z 2290:「金属材料の高温腐食試験方法通則」、JIS Z 2291:「金属材料の高温ガス腐食試験方法」、JIS Z 2292:「金属材料の塩塗布高温腐食試験方法」、JIS Z 2293:「金属材料の塩浸せきおよび塩埋没高温腐食試験方法」、JIS Z 2294:「金属材料の電気化学的腐食試験方法」と 5 件の高温腐食評価に関するヒーター加熱試験方法が規格化されている。

一方、高温での耐食・耐酸化コーティング、あるいはセラミック遮熱コーティングを施した耐熱合金に関しては、ヒーター加熱による高温連続酸化試験と高温繰返し酸化試験(熱サイクル試験)、さらに高温腐食試験の実施例が従来から数多く報告^{8),9)}されてきた。しかし規格化に関しては、ようやく 2007 年に JIS H 8451「遮熱コーティングの耐はく離性試験方法」、JIS H 8452「耐酸化金属コーティングの耐はく離性試験方法」の 2 件のヒーター加熱による熱サイクル特性評

価試験方法が規格化されている。具体的な試験方法を図6に示す。熱サイクルによる耐熱コーティング部材の耐はく離性試験は、対象とするコーティング試験体をヒーターで一様に加熱した高温槽と低温槽の間を移動させることで実施される。この熱サイクル試験では、コーティングのはく離面積率とはく離繰返し数の関係を実験的に求め、ある一定の限界はく離面積率(30%)を越えないとして得られる限界はく離繰返し数を求めて、耐熱性の評価を実施することが規定されている。

また、セラミック遮熱コーティング特有の問題として、JIS H 8451 には熱衝撃特性評価試験方法も規定されていることは特筆に価する。その具体的な試験方法は図7に示すが、コーティング試験体をヒーターで一様に加熱した高温槽で保持した後、水中に投下することで急冷して熱衝撃を付与する。この熱衝撃試験後にコーティングの残存密着強度を JIS H 8402 にしたがって測定し、残存密着強度が熱衝撃付与により 30%低下する直前の熱衝撃温度差、すなわち耐熱衝撃温度差を求めることで耐熱性の評価を実施することが規定されている。図8には、8% Y_2O_3 安定化 ZrO_2 遮熱コーティングの耐熱衝撃特性を明らかにするため、大気中プラズマ溶射により形成した Al_2O_3 コーティングと比較して実施した熱衝撃試験結果の一例を示す。ただし、基材には SUS 304 ステンレス鋼を用いている。図から明らかのように、大気中プラズマ溶射により形成した Al_2O_3 コーティングの耐熱衝撃温度差は $\Delta T=500^\circ C$ であるのに対し、8% Y_2O_3 安定化 ZrO_2 遮熱コーティングの耐熱衝撃温度差は $\Delta T=900^\circ C$ 以上と高い値を示すことが分かる。さらに8% Y_2O_3 安定化 ZrO_2 遮熱コーティングは、10回の熱衝撃付与、あるいは $900^\circ C \times 100$ h の酸化処理後に熱衝撃付与しても顕著な残存密着強度の変化は認められなかった¹⁰⁾。

3. 4 耐熱コーティングの特性評価試験方法

一般に、コーティングに関する規格化の現状に関して、日本工業規格(JIS)では膜厚測定、密着性評価、耐食性評価、硬さ測定、耐摩耗性評価、表面粗さ測定に関する規格化が中心に進められている。目を転じて欧州規格(EN)を眺めると、それに加えてコーティング組織評価、コーティングの機械的特性評価の規格化に注力している様子が確認できる¹¹⁾。

一方、高温機器など厳しい環境で使われる耐熱コーティングに関しては、コーティング設計概念の導入が不可欠である。従来のコーティングは勘と経験の世界を抜け出せず、試行錯

誤の中で経験則を導き出して適用している場合がほとんどである。少なくとも、コーティングの特性を明らかにし、熱伝導解析や熱応力解析などに基づいたコーティング設計を行う必要がある。そのためには、以下に示すような耐熱コーティング特性評価試験方法の規格化が、今後、重要になると考えられることを報告した¹¹⁾。

A、機械的特性に関する規格化

- (a) コーティングの弾性定数(ヤング率, ポアソン比)評価試験方法
- (b) コーティングの破壊強度(曲げ, 引張)評価試験方法
- (c) コーティングの破壊靱性評価試験方法
- (d) コーティング, あるいはコーティング部材のクリープ(曲げ, 引張)試験方法
- (e) コーティング, あるいはコーティング部材の疲労(曲げ, 引張)試験方法
- (f) コーティング, あるいはコーティング部材の熱衝撃試験方法
- (a)~(c), (e) の高温特性評価試験方法

B、熱的特性に関する規格化

- (a) コーティングの熱拡散率・比熱容量・熱伝導係数評価試験方法
- (b) コーティングの熱膨張係数評価試験方法
- (c) コーティングの熱輻射率評価試験方法

以上の観点により、2006年から3年間の予定でNEDOプロジェクトが発足しており、耐熱コーティングの熱的特性(熱伝導率, 熱膨張係数), 機械的特性(ヤング率, 曲げ強度, 残留応力)の評価試験方法についてJIS原案作成委員会活動が進められている¹²⁾。

著者ら¹³⁾は、コーティングによる基材のたわみ変形を測定して固有ひずみを精度良く算出することにより、コーティング部材に生じる残留応力分布を評価する手法を示している。JIS原案作成委員会では、この固有ひずみ法に基づいてCoNiCrAlY合金コーティング部材(基材:SUS 304)の残留応力測定試験を実施しており、得られた結果の一例を図9に示す。大気中プラズマ溶射でCoNiCrAlY合金コーティングを施すことにより、コーティング層には引張残留応力が生じていることが分かる。この引張残留応力はコーティ

図7 遮熱コーティングの耐はく離性試験方法(JIS H 8451)

図8 セラミックコーティングの熱衝撃試験結果の一例

図9 耐酸化金属(MCrAlY 合金)コーティングの残留応力測定結果の一例

ング表面の方がコーティング/基材界面よりも若干低くなる。また、基材には曲げ応力成分が生じており、コーティング/基材界面では圧縮残留応力、基材裏面では引張残留応力が生じていることが分かる。今後、本手法の妥当性に関しては実験的検討を加える予定である。

4. おわりに

ガスタービンの耐熱コーティング技術は、材料・プロセス技術、コーティング設計技術、非破壊検査を含む寿命・特性評価技術の3要素から構成される¹⁾。従来の耐熱コーティング技術に関する研究開発は、材料・プロセス技術を主体に特性向上を目指して行われてきた。しかし、セラミック遮熱コーティングのさらなる高機能化と高性能化、高信頼性化を進めるためには、コーティング設計技術の開発が必須である。しかしながら、コーティング設計のためのデータベースは、本稿で規格・標準化の動きを紹介したように、最近ようやく整いつつあるのが現状である。

また、耐熱コーティング部材の寿命・特性評価技術についても、本稿で紹介したように世界に先駆けた規格・標準化が日本からの発信で進められつつある。これらが充実できれば、

ガスタービンなど運転プラントの高い信頼性が確保されるとともに、経済面では保守管理基準を合理的に決定することが可能となる。しかしながら、耐熱コーティング部材の非破壊検査に関する規格・標準化の動きは現時点で皆無であり、これからの重要課題と考えられる。

今後、耐熱コーティング技術分野での規格・標準化による国際競争力強化は、ますます重要度を増すと考えられる。そのため、産学連携による規格・標準化の加速は必須事項である。今後の耐熱コーティング技術の、飛躍・発展に期待したい。

(2008-3-31 受理)

文 献

- 1) Y. Itoh; *Bulletin of the Ceramic Society of Japan*, 41, (10), 821 (2006) (in Japanese).
- 2) Y. Iida and K. Shibuya; *Toshiba Review*, 56, 8 (2001) (in Japanese).
- 3) Y. Itoh; *Science of Machine*, 47, 848 (1995) (in Japanese).
- 4) N. J. Kushner and B. Rotolico; *2nd Plasma-Technik Symposium*, 2, 89 (1991).
- 5) Y. Itoh; *Science of Machine*, 59, 998 (2007) (in Japanese).
- 6) Y. Itoh and A. Kawasaki; *Science of Machine*, 57, 750 (2005) (in Japanese).
- 7) A. Kawasaki, A. Hibino, R. Watanabe; *Journal of Japan Institute of Metals*, 56, 472 (1992) (in Japanese).
- 8) Y. Itoh; *Science of Machine*, 52, 1152 (2000) (in Japanese).
- 9) Y. Itoh and M. Yoshida; *Science of Machine*, 57, 864 (2005) (in Japanese).
- 10) New Material Center in affiliation with Osaka Science & Technology Center; The Report for Standardization of Integrity Evaluation & Testing method of Heat-Resistant Coatings, (2006-3) (in Japanese).
- 11) Y. Itoh; *Science of Machine*, 57, 633 (2005) (in Japanese).
- 12) New Material Center in affiliation with Osaka Science & Technology Center; The Report for Standardization of Characteristics Evaluation & Testing method of Heat-Resistant Coatings, (2008-3) (in Japanese).
- 13) Y. Itoh, A. Tanaka, K. Saitoh and R. Takaku; *Transaction of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A*, 70, 1399 (2004) (in Japanese).