技術資料

新素材の接合シリーズ

ニューセラミックスの接合プロセス
とその応用(Ⅱ)*

—非酸化物系ニューセラミックスの接合技術—

小山田

彬**, 藤井

新**

Joining Process and its Application of New Ceramics (Part Ⅱ)*

by Akira Oyamada** and Shin Fujii**

キーワード：非酸化物系セラミックス，接合法，ろう付接合，活性金属法，
固相接合法，熱応力解析，界面構造解析

1. はじめに

イオン結合性の強い酸化物系ニューセラミックスが、電子機器用の機能性材料として脚光を浴びているのに対して、窒化珪素、炭化珪素に代表される共有結合性の強い非酸化物系ニューセラミックスは、高温で高強度である、鉄鋼材料に較べて軽量化が図れる、高硬度で耐摩耗性がある、化学的に安定であるなどの優れた特性を有することより、主として金属材料の適用が困難な高温雰囲気下での構造用材料として期待され、近年研究開発が著しく盛んになっている。

しかしニューセラミックスといえども、セラミックスの最大の欠点である「脆性」は十分に改良されたとは言えず、衝撃に弱い、許容される欠陥サイズが小さい、強度のばらつきが大きい、遅れ破壊現象を示す、更には難加工性である、などまだまだ難点が多く非酸化物系ニューセラミックスを構造用材料として使いこなしていくためには、これらの難点を金属材料で補完し、適材適所の組合せによる複合化構成の技術開発が必要である。中でも最も重要な技術は、金属材料との接合技術であり、実用化のキーテクノロジーと言っても過言ではない。しかし接合強度が接合材料強度と同等で、接合作業も高温高压を必要とせず、更には接合体形状にも制約がないような接合法は未だ開発されていない。接合技術の研究は、基礎的な研究と実用化の研究が同時並行的に

進んでおり、実用的接合法の開発を目指して発展途上にあるのが現状である。

本稿においては、非酸化物系ニューセラミックスと金属材料の接合で適用されている接合技術を中心として、接合法、接合上の留意点、実用例、今後の課題などについて概要を説明する。

2. 非酸化物系ニューセラミックスの接合技術

2.1 接合法の概要

非酸化物系ニューセラミックスの接合に適用されている接合法を図1に分類した。このような多様な接合法が研究開発されている背景には、非酸化物系ニューセラミックスが反応性が低く、高い接合強度を得るために何等か

図1 非酸化物系ニューセラミックスの主な接合法

*原稿受付 昭和61年9月16日

** 日産自動車(株)中央研究所材料研究所
Nissan Motor Co., Ltd. Central
Engineering Laboratories

の濡れ性改善法, 表面改質法などの技術開発を必要としたことが挙げられる。現在の接合強度のレベルはまだまだ低く, 接合法の研究開発の流れは, 接合強度の向上が期待できるろう付接合法, 固相接合法の方向に集約されようとしている。以下に主だった接合法について述べる。

(1) 機械的接合法

ボルト締めや焼バメに代表される機械的接合法は, 物理的な力によって接合を行なうものであり, 非酸化物系ニューセラミックスと金属材料の接合に適用されている。ニューセラミックス側に圧縮応力が掛かるような接合設計が必要であるが, 有限要素法などの数値解析によって接合強度を設定しやすいため, 応用性が広い接合法と言える。しかし高温雰囲気下では, 金属材料の熱膨張のため接合強度が低下してくるので, 必要な接合強度を保持するために初期に過大な圧縮応力を設定しなければならず, 非酸化物系ニューセラミックスの特徴である耐熱性を活かすための接合法としては, あまり好ましい方法とは言えない。

(2) 酸化物溶剤法

酸化物を溶剤として用い, この溶剤を接合材料表面に塗布し, 重ね合わせて加熱処理し, 接合を行なう方法である。溶剤が溶融し, ガラス相となり, この中に接合材料が溶出, 反応して結合層を形成するため, 接着剤による接合法の中では高い接合強度が期待できる方法である。接合系全体を溶剤の融点以上に加熱するので, 接合材料が軟化, 変形しないことが前提条件となり, 非酸化物系ニューセラミックス同志の接合には好ましい方法と言えるが, 金属材料との接合には不向きである。現在の接合強度レベルは, 窒化珪素同志の場合で, 接合材料自体の強度の $1/3 \sim 1/2$ 程度であり, 今後の改良研究が期待されている。

(3) メタライズ法

メタライズ法は, セラミックス表面に金属層を形成

させる手法の総称であり, 金属化合物を塗布し加熱分解させて金属を析出しセラミックスと反応させる方法, 気相から金属を析出させる方法, 金属メッキによる方法などがある。接合技術の場合, ろう付接合の前処理として広く行なわれているものである。一般的にセラミックスと金属材料の界面で拡散や反応が生じ, 化学的結合が起こる場合に高い結合強度が得られると考えられており, ろう付接合のメタライズ処理は, 比較的融点の低い金属の化合物ペーストをセラミックス表面に塗布して焼付けする方法が多数考案されている。図2に非酸化物系ニューセラミックスの接合に適用されている代表的なメタライズのプロセスを示す。また最近予備拡散法, 直接メタライズ法と呼ばれる新しい方法が発表されている。真空加熱処理により, ニューセラミックスを被覆した金属粉末の拡散反応によって直接ニューセラミックスをメタライズする試みであり, 注目される方法である。更に熔融金属にニューセラミックスを浸漬し, 金属層を形成させる方法も見直され, 研究が盛んになっている。

(4) 活性金属法

ろう付接合法の代表的な方法で, メタライズと接合を同時に行なうものであり, 非酸化物系ニューセラミックスの主要な接合法の一つである。活性に富んだ Ti, Zr などのIV族元素が非酸化物系ニューセラミックスに良く濡れるのを利用した方法で, 活性な金属をろう材に混合しておく方法, 活性な金属の箔とこれと比較的低融点の合金を形成する Ag, Cu, Ni などの金属箔を積層して使用する方法, あるいは予め合金化して金属溶剤として使用する方法などがある。中でも Ti 入銀ろうによる接合法は広く適用されており, 研究発表も非常に多い。

Ti, Zr ほどの活性な金属ではないが, Al, Al 合金の高い活性, 低融点を活かした, 金属溶剤として使用する研究が発表されている。この方法では, Al, Al 合金の塑性変形によって, 接合時に発生する熱応力が緩和される効果が期待でき, 注目されはじめている。

(5) 高压接合法

固相状態で接合する代表的な接合法であり, 接合材料を直接接合する場合と, インサート材を挿入して接合する場合がある。接合材料を密着させ圧力をかけながら加熱すると, 融点以下の温度で拡散反応が生じて接合することができる。圧力, 温度, 時間が主要なパラメータであり, 表面粗度や雰囲気なども接合強度に関与する。使用されている設備は, ホットプレス装置, 熱間静水圧プレス装置が代表的であり, 他に超高压発生装置の使用例もある。直接接合する場合は, 高温, 高压, 長時間を必

図2 メタライズ接合プロセス

要とし、また接合で発生する熱応力の緩和方法にも問題があり、同種のニューセラミックスの接合にしか適用されていない。一方インサート材を挿入する場合は、低温、低圧、短時間の接合が可能であり、また、発生熱応力の緩和も比較的容易であるため、ニューセラミックス—金属、ニューセラミックス同志の接合に適用され、研究開発例も多い。インサート材としては、活性が高い Ti, Al, などの金属及び合金が使用されている場合が多い。

2.2 非酸化物系ニューセラミックスの接合研究例

最近二年間の溶接学会、日本金属学会、窯業協会、窯業基礎討論会の講演概要集より、非酸化物系ニューセラミックスの接合に関して発表された研究例を表 1 にまとめてみた。個々の研究内容は各講演概要を参照していただき、ここでは概要について述べる。

表 1 非酸化物系ニューセラミックスの接合研究

Si ₃ N ₄ セラミックス		SiC セラミックス	
Si ₃ N ₄ —金属	27件	SiC—金属	11件
メタライズ法	4	メタライズ法	2
活性金属法	15	活性金属法	4
高圧接合法	5	高圧接合法	5
摩擦圧接法	2	金属の種類：ステンレス鋼、インバー合金、Fe, Ni, Co 等	
酸化物溶剤法	1		
金属の種類：鉄鋼、Al 合金、Cu, W, インバー合金、Ta, コパール合金			
Si ₃ N ₄ —Si ₃ N ₄	25件	SiC—SiC	5件
酸化物溶剤法	6	活性金属法	3
活性金属法	8	高圧接合法	1
高圧接合法	5	電圧印加法	1
反応接合法	3		
電圧印加法	1		
その他	13件	その他	4件
表面改質、反応性等	5	表面改質、反応性等	4
熱応力解析	3		
界面解析等	5		

(1) 窒化珪素の接合

非酸化物系ニューセラミックスの接合研究の約70%を占めており、窒化珪素が現在構造用ニューセラミックスとして実用性が評価されていることをよく反映している。中でも窒化珪素—鉄鋼材料の接合研究が多く、適用されている接合法は、活性金属法、メタライズ法などのろう付接合法である。使用されているろう材は、Ti 入銀ろう、Al 及び Al 合金溶剤、活性金属を合金化した金属溶剤の順に多い。真空加熱炉が使用され、無加圧または無加圧に近い状態（重し程度）で接合が行なわれている。Al 及び Al 合金溶剤を使用した研究で

はホットプレス装置を使った例もある。

窒化珪素同志の接合では、直接接合させる研究よりもインサート材を挿入させて、熔融状態を利用して接合する研究が多く、活性金属法、酸化物溶剤法が主流の接合法となっている。実用的な接合法で高い接合強度を得るためには、窒化珪素同志の接合といえども、溶出、拡散、化学反応が促進される熔融状態の存在を利用する接合法が選択されるのは必然的な傾向と言える。

研究発表されている接合体の強度レベルは、接合材料自体の強度レベルよりもまだ相当低い。評価試験法、使用されている窒化珪素の種類など様々であるため、一概に言えないが、常温の四点曲げ強度で窒化珪素—金属の場合約 20 kgf/mm² 程度、窒化珪素同志で約 50 kgf/mm² 程度が最高値である。

接合体の界面結合構造の解析では、光学顕微鏡、SEM—EDX, EPMA, X 線回折などの解析装置を使用した拡散層の観察や、生成相の化合物同定などが主であるが、Ti 入銀ろうを使用して接合した窒化珪素接合界面を、TEM によって直接観察した研究発表が目新しく、界面結合構造解析の方向を示すものとして今後の研究の発展が期待される。その他接合強度の向上を目指した熱応力解析の研究発表も多くなっている。

(2) 炭化珪素の接合

炭化珪素の接合研究は、窒化珪素の接合研究と同時にに行なわれた発表例が多く、従って接合法も活性金属法、高圧接合法が主流となっている。いずれの接合法においても、また炭化珪素—金属材料、炭化珪素同志の接合においても、Ti, Zr, Al, Al 合金などの活性金属を挿入して接合する研究例が多い。接合強度レベルは炭化珪素—金属材料で約 10 kgf/mm² 程度、炭化珪素同志で約 30 kgf/mm² 程度であり、接合界面の構造解析も窒化珪素の場合と同様のレベルで行なわれている。

また炭化珪素の導電性を利用して、電圧を印加し接合する試みが発表されているが、やはり Ti を挿入して接合強度の向上が図られている。その他目立つのは、熔融金属特に熔融アルミ合金との反応性を研究した発表例が多いことである。

(3) その他の非酸化物ニューセラミックスの接合

窒化珪素、炭化珪素以外の非酸化物系ニューセラミックスについては、研究発表が少なく、材料自体が構造用ニューセラミックスとして研究されることが少ないことを反映している。例外は構造用ニューセラミックスとして期待されているサイアロンであるが、Al 合金、Fe—Ni—Cr 系合金をインサート材として使用し、ホットプレスにより高圧接合を行なった研究発表がある。接合強

度も約 30 kgf/mm² に達しており, 研究の発展が期待される。

2.3 接合強度の評価について

接合研究例をまとめてみると, 接合強度の評価試験法が, 曲げ試験, 引張試験, 剪断試験, 振り試験など研究者によって様々であることが判る。更に使用されているニューセラミックスの性状, 試験体の形状なども様々であり, 現状では研究者間の相対比較は困難であり, 最適な接合法を特定することも難しい。言い換えれば, 接合技術の研究が発展の途上にあるということである。このような状況下で考慮すべきことは, “接合強度の測定目的に合った強度試験を行なう” 必要性があるという点である。表 2 に²⁾示すような二つの目的に分けられるが, 現在のところこの両者が混在した形で強度試験が行なわれているきらいがある。I の目的に対するニューセラミックス接合体の標準化された評価試験法の確立が望まれるが, 現在通産省工業技術院, (社)日本溶接協会の間で, 規格化のための調査が始まったばかりであり, 確立までは相当の時間を要するものと思われる。表 3³⁾に各試験法で留意すべき項目を示すが, 試験体の作製法が接合強度に影響するため, 相対比較を行なう目的に対しては, 試験体の作製法も標準化する必要があるものと思われる。

2.4 接合強度に影響する因子

接合強度の評価法に問題はあがあるが, 接合強度の向上を図るためには, 接合法の種類によらず接合材料の物性に基づく諸現象, 接合界面で起こる諸現象の両面から研究を行なうことが必要である。接合強度を界面の結合強度のみならず, 接合体強度として把えて初めて実用的な意味を持つものであり, ミクロ的, マクロ的な観点から接合強度に影響する因子を検討しなければならない。表 4 に接合強度に影響する諸因子を示す⁴⁾。非酸化物系セラミックス-金属材料の接合の場合は, これらの諸因子の中でも特に熱膨張係数の差と界面生成物が重要な因子となってくる。

表 2 強度試験目的と方法

	接合強度の測定目的, 観点	強度試験法
I	・接合強度の相対値比較を行う ・接合機構の解明のための接合強度比較を行う	・標準化された試験法 (接合体の作製条件, 試験体形状, 試験条件)
II	・セラミックスを含む接合体の強度の絶対値を得る (要求強度に対する接合継手構造としての強度保証)	・実体の使用環境条件に則した単体の強度試験法

表 3 各試験の留意項目

	曲げ試験	引張試験	ねじり試験	剪断試験
試験体の作製法	<ul style="list-style-type: none"> ・接合体から試験体を切り出し加工する事による影響 <ol style="list-style-type: none"> 1. 切り出し位置による内部応力の差異 2. 切り出しによる接合体の内部応力の変化 3. 表面加工欠陥の導入 			
試験体の形状	<ul style="list-style-type: none"> ・セラミックスでの破壊を生じる場合には, セラミックスの平均強度と寸法効果の関係から, 形状の大小により異なる強度を示す 			
試験法	<ul style="list-style-type: none"> ・接合の残留応力を含む試験では, 印加応力分布の面から 4 点曲げが優位 ・曲げ成分の少ない試験治具構成 			

熱膨張係数の差は熱応力の発生を招く。いずれの接合法においても, 接合界面での諸反応を促進し, 強固な結合構造を得るために高温下で接合を行なうが, 得られた接合体を冷却してくる過程で, 接合材料の熱膨張係数の差によって接合部に熱応力が発生する。セラミックスが塑性変形しないため, この熱応力が接合体に残留応力として持ち越され, 結果的に接合強度を低下させる。窒化珪素, 炭化珪素などの非酸化物系ニューセラミックスは, アルミナ, ジルコニアなどの酸化物系セラミックスに比べて, 熱膨張係数は 1/2~1/3 であり, 金属材料との接合においては, 格段の技術的困難を伴っており, 如何に熱応力を低減するかが接合研究の最大の課題になっている。

熱応力を低減する方法として, 接合材料間に中間的な熱膨張係数の材料を挿入する方法, 塑性変形しやすい軟質金属を挿入する方法, それらの組合せなどが考えられている。研究発表例で活性金属法が多く見られるのは, ろう材の塑性変形を利用した熱応力の低減効果が期待されるためである。熱応力低減に有効な材料としては, Mo, W, WC, コパール合金, インバー合金, Cu, Al, Al 合金, Ni, Ag-Cu 合金など金属材料が挙げられる。

また実用的には, 接合継手形状の制約の中で最適な熱応力緩和構成を開発するため, 有限要素法などの数値解析手法を導入していく必要があり, 研究発表も増えはめている。

一方界面の生成物は, 共有結合と金属結合の間において, 両者に対して結晶構造の整合性を持つこと, 生成物自体が機械的強度を有することなどが求められている。しかしながら, 接合界面の微細構造を直接観察し, 検討

表4 ニューセラミックス接合に関し検討すべき諸因子と解決策⁴⁾

	接 合 支 配 因 子	問 題 点	設計上の解決策
接 合 材 料 物 性	(1) 熱膨張係数の差 $\alpha_{\text{金属}} \gg \alpha_{\text{非酸化物セラミックス}}$ (2) 機械的性質の差 ① 弾性係数の差 $E_{\text{金属}} < E_{\text{非酸化物セラミックス}}$ ② 強度の差 セラミックスは圧縮に強いが引張には弱い。中間層の強度。	接合温度からの冷却過程で界面に残留応力 ↓ セラミックスで破壊	(1) 中間熱膨張係数物質層 (2) 残留応力緩和層 (3) 引張応力をセラミックスに与えない形状設計
	(3) 原子結合様式の差 セラミックス…共有結合、イオン結合 金 属…金属結合	① 直接結合困難 ② 原子拡散固溶度	(1) 高温高圧使用 (2) 活性物質添加 (3) 反応生成物のコントロール
	(4) 高温物性の差 ① 昇華分解するセラミックスあり ② 酸化による強度劣下	融接不可能	接合雰囲気制御
	(1) 接合物質間のめれ、拡散 (2) 界面生成物の強度 金属間化合物、Silicide などの脆弱層形成 (3) 界面構造	接合後の界面ハクリ	(1) 活性物質添加など材料系の組合せ (2) 反応生成物のコントロール (3) 被接着体へのアンカリング

を行なった研究が極めて少なく、まだ十分な知見が得られていないのが現状である。接合の基本的課題であるだけに、今後の研究の発展に期待したい。

3. 非酸化物系ニューセラミックスと金属材料の接合技術例

構造用ニューセラミックスとして現在最も注目されている窒化珪素について、筆者等が行なっている鋼材との活性金属法によるろう付技術について端面突合せ接合を例に説明する。

3.1 接合体の応力解析と接合構成⁵⁾

窒化珪素（常圧焼結体、引張強度約 40 kgf/mm^2 ）と鋼材（SNCM 439）の材料間には大きな熱膨張係数差（約 $10 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ）があり、ろう付処理温度から冷却すると残留応力が内在し、接合体強度が低下する。この残留応力を低減するため、有限要素法による接合部の弾塑性モデル解析を行なった。要素数は150で接合部近傍をより細かく分割し、計算は銀ろうが機械的強度を持ち始めると考えられる 650°C より行なった。

まず窒化珪素—鋼材の接合の場合は、接合界面より約1mmの位置の窒化珪素の外周上で、最大引張応力が発生しており、約 32 kgf/mm^2 であった。この値は窒化珪素の引張強度に近く、接合体は極めて小さな応力で破壊することが予測された。

次に熱応力緩和のためインサート材を挿入した接合体の解析を行なった。図3に示す接合形状に対して要素数186に分割した。インサート材料としては、中間熱膨張係数を有する金属、塑性変形しやすい軟質金属から数種

類を選び、厚さ、組合せを変えて解析した。図4にコパール、Niを単独で挿入した場合の計算結果を示す。コパールの場合は厚さが増すに従い、残留応力の低減効果が大きくなっていくが、Niの場合はある程度の厚さになる

図3 熱応力解析形状

図4 インサート材厚さによる応力変化

と、低減効果は一定となる。この結果より両者の組合せによって、低減効果は更に大きくなることが予測される。図5にコバルト 1.0 mm, Ni 0.5 mm のインサート材を挿入した場合の応力分布状態を示す。最大引張応力は 15 kgf/mm^2 と大きく低下しており、良好な接合体を得ることが期待される。図6にインサート材を組合せた場合の計算結果と、実際の接合体の引張強度試験結果を示す。計算値と測定値の和は約 30 kgf/mm^2 であり、残留応力が接合強度を大きく左右すること、及び有限要素法による弾塑性モデル解析が、接合部設計に対して有効であることが理解できる。

図5 熱応力解析結果

図6 インサート材の組合せと計算による熱応力値、引張強度の関係

3.2 接合界面の解析⁶⁾

図 7 に窒化珪素と鋼材の Ti を用いたろう付接合部の断面観察と EPMA 分析結果を示す。Ti が窒化珪素側に凝集して層状に検出され、この層に Si, N が拡散していることより、Ti と窒化珪素の反応が生じているものと考えられ、以下の二つの実験を行ない、界面の極微小部分析を行なって確かめた。

(1) 粉末混合体の分析

窒化珪素粉末と Ti 粉末を混合圧粉し、ろう付接合同様の熱履歴を施し、これについて X 線回折による反応生成物の同定を行なった。この結果、TiN、TiO₂、Ti₅Si₃、Si₃N₄ が検出され、加熱処理温度を変えると温

図7 接合部断面の SEM 観察及び EPMA 分析

図8 混粉圧縮体のX線回折

図9 Si_3N_4 とTiの反応実験

度の上昇とともに、 TiN 、 Ti_5Si_3 が増加し、 TiO_2 、 Si_3N_4 が減少し、反応が促進されることが見出された(図8).

(2) Ti と反応層の界面分析

図 9 に示す方法により、窒化珪素上の金属光沢を示す

部分の SIMS 分析, ESCA 分析を行ない, 更に余剰 Ti の窒化珪素側の X 線回折を行なった。

SIMS 分析により, N, Si など含んだ Ti 層が 3500~4000 Å の厚さで観察された。ESCA による Ti の分析では, 表面から深さ方向において Ti (チタンシリサイドを含んでいると推定される), TiN, TiO₂ が検出され, 表面から内部へ向けて Ti は減少し, TiN, TiO₂ が増加した (図10)。また余剰 Ti の X 線回折からは Ti, TiN, Ti₅Si₃ が検出された。

以上の結果, 窒化珪素と Ti は反応し, TiN, Si, Ti₅Si₃ などの化合物を生成することが見出された。実際の接合体においては銀ろうが関与しているが, 上記実験結果で得た反応が窒化珪素と Ti の凝集層の界面でも生じており, 接合の重要な役割りを果しているものと考えられ, 一つの接合モデルを図11に示す。しかし接合界面の解析は実験, 観察の困難さにより研究例が少なく,

図10 ESCA による Ti の分析

表5 非酸化物ニューセラミックスの接合実用例 (エンジン)

部 品 名 称	接 合 材 料	接 合 方 法
グロープラグ	Si ₃ N ₄ -耐熱合金	ろう付接合
ホットプラグ	Si ₃ N ₄ -アルミ	機械的接合 (ワッシャ圧入)
ロッカーアームチップ	Si ₃ N ₄ -アルミ	機械的接合 (鋳ぐるみ)
ターボチャージャロータ	Si ₃ N ₄ -合金鋼	ろう付接合, 機械的接合 (焼バメ)

図11 推定される接合機構

推論の域を出ない現状にあり, 更に深く掘り下げた研究が必要となっている。

4. 非酸化物系ニューセラミックスの接合実用例

非酸化物系ニューセラミックスの接合の実用化は, 端緒が開かれたばかりであり, これから発展していくものと思われる。表5に現在までにエンジンへ適用された実用例を示す。接合の実用化技術開発について, ここでは内燃機関用セラミックスターボチャージャロータを例に, 概要を説明する⁷⁾。

図12にセラミックロータ回転体 ASSY を示す。セラミックスターボチャージャロータを実用化する場合, ニューセラミックス材料そのものの技術確立がなされていることは当然必要であるが, エンジン設計の立場からは, 万が一セラミックロータが破壊した場合でも, エンジンに影響を及ぼさないことが前提条件となる。そのため接合部を設計するに当たっては, 潤滑油流出や, 潤滑油中へのセラミック片の混入を防ぐために, リングシール部までは金属

図12 セラミックロータ回転体 ASSY (左: アルミ合金圧縮機, 右: セラミックスタービンロータ)

材料とし、排気ガスに直接接触するロータ翼部をセラミックス化するのが妥当である。接合部の設計上必要な温度分布として、最も厳しいヒートソークバック時のロータ部の測温結果を図13に示す。この温度分布に充分耐える高強度な接合法として、ろう付接合法を採用した。接合部構造を図14に示すが、セラミックス軸と金属軸の接合時に発生する残留応力を緩和するために、緩衝層を設けた構造としている。

接合部の評価としては、接合体としての強度（振り、曲げ、引張など）、耐久性、信頼性評価のため、テストピース及びロータと同一形状の接合試験体を用いて、常温及び高温での強度試験、衝撃試験を繰返し行なった。更にターボチャージャロータ単体での破壊試験、耐久試験、振動試験及びエンジンに実装しての各種耐久試験、

故障モード試験など従来以上の多数のテストを行ない、接合体としての充分な実用性を確認している。

5. あとがき

以上非酸化物系ニューセラミックスの接合について、概括してきたが、接合技術そのものが発展途上にあり、多くの課題を抱えているのが現状である。更に非酸化物系ニューセラミックス自体も研究開発が活発に行なわれているため、研究者間の相対比較は事実上困難であること、実用化に当っては使用目的を踏まえた最適の接合法、評価方法を選ぶのが必要であることなども前述の通りである。ここ当分の間は、基礎的な研究と実用化研究の両面から、接合技術データの蓄積が続いていくものと思われる。

今後非酸化物系ニューセラミックスが構造用材料として、その適用が拡大されていくためには、素材及び接合体の評価試験法が標準化されることが第一に必要と考える。更には品質保証のための非破壊検査技術の開発も必要である。また接合技術においては、熱応力低減の技術開発や接合界面の解析と同時に、金属材料の特性がニューセラミックスの特性に近づくようなイオン注入技術や、表面非晶質化の技術など、金属表面の改質技術の開発も重要になってくるものと考えられる。

非酸化物系ニューセラミックスの接合技術について、できるだけ広い見地から現状を総括的に把握できるように努めてみた。個々の詳細に立ち入ることはできなかったが、この点に関しては、各々の文献を参照していただきたい。

引用文献

- 1) 溶接学会全国大会講演概要集35, 36, 37, 38集
日本金属学会講演概要集95, 96, 97, 98回
窯業協会年会講演予稿集1985年, 1986年
窯業基礎討論会講演要旨集23, 24回
- 2), 3) 的場: 窯業協会関東支部講習会資料 p 18 (1986)
- 4) 田中: 学振 124 委員会資料 124-24-28-84 (1984)
- 5) 真木: 日本金属学会61年秋期大会発表予定
- 6) 松長: 日本金属学会講演概要集第98回 (1986), p 142
- 7) 川瀬: 学振 124 委員会資料 124-32-7-86 (1986)

図13 軸部の温度分布

図14 接合構造