

脆性固体等の破壊損傷の究明と強度評価法の確立

Clarification for Fracture/Damage of Brittle Bodies and Establishment of Strength Evaluation Method

岡部 永年

Nagtoshi OKABE

From the industrial standing point, some sorts of metal materials and reinforced plastics used as structural or insulating parts in electric and mechanical machines were studied for their damage mechanism and failure properties, and so their new strength evaluating method with considering the time and temperature-dependence was devised to be useful for life assessment as well as mechanical design. Ceramics of typical brittle body were studied for their damage mechanism and probabilistic failure properties, and so the novel unificational strength evaluating method was proposed with considering both probabilistic defect dispersion and loading duration time, and can be evaluated probabilistically many strength data obtained by different conditions of applied stress and specimen size considering with effective volume as well as effective loading duration time. Both evaluation methods can estimate, also, the temperature-dependence of strength on the basis of active process concept and had been generally acknowledged to be very valuable for science as well as engineering.

Keywords: Brittle fracture, Impact fatigue, mild steel, Ceramics, Impact stress, Unificational evaluation

1. 緒 言

日本機械学会より筆者が名誉ある材料力学部門功績賞を授与されるに至った研究業績について、まず、最初に全般にわたり簡単に概説する。ついで、主要な研究成果および学術的功績や産業界への貢献について述べる。産業界に在職中での企業研究機関における研究技術者の立場から、インパルス衝撃応力の繰返しによる機器構造部材の疲労破損に注目して鋼材¹⁾²⁾³⁾、銅材⁴⁾、アルミニウムなどの各種構造材料ならびに FRP 絶縁構造材料⁵⁾に対して系統的な実験により衝撃疲労現象を明らかにし、有効負荷時間の概念を考慮して、インパルス衝撃応力に対する時間依存型の評価法を確立してきた。さらに、欠陥支配型の破壊を呈する脆性材料のセラミックスに対しては、発展的に有効体積の概念を更に導入してインパルス衝撃応力も含めた動的・静的負荷応力に対す

*日本機械学会(No. 06-4) M&M2006 材料力学カンファレンス講演論文集('06. 8. 4-6, 浜松市)

** 松山市文京町3 愛媛大学大学院理工学研究科 生産環境工学専攻(機械工学コース)

** Graduate School of Science and Engineering, Ehime University

る即時破壊強度および遅れ破壊強度を破壊確率論的に評価できる統一的評価法^{7)~10)}を確立してきた。これにより弾性・脆性固体における統計破壊力学が体系化された。これらの評価法はインパルス衝撃負荷応力を受ける機械構造部材の破壊損傷の究明や強度設計法の確立に、また、脆性破壊に対するセラミックス部材の強度設計法¹¹⁾¹²⁾の確立に多大な工学的貢献を果たした。工業的には、電気開閉機器の高速・大容量化への発展や高効率セラミックスガスタービンの開発に多大な貢献を果たした。金属材料において単一衝撃破壊と表裏一体の関係にある高速変形の研究として鋼板・アルミ板における高速塑性変形抵抗の数式モデル¹³⁾を提唱し、コンピュータ制御の先駆けとなった計算機制御高速圧延プラントの開発にも多大な貢献を果たした。一方、複合発電用高温ガスタービンにおける寿命診断技術開発にあたって、既成概念に捉われない発想から超合金の高温強度・損傷特性の研究に取り組み、マイクロとマクロの融合特性を考慮した損傷機構を明らかにし、寿命診断のみならず材料開発に大きく寄与してき^{14),15),16)}た。以上のように企業研究の経験から材料力学における広範な分野で数多くの研究業績を挙げ、企業での新製品開発や製品信頼性の向上に対して多大な貢献をしてきた。一方、愛媛大学に奉職後、大学研究機関における教育研究者としての立場からは、実務的研究業績に対する学術的深耕の観点から、脆性固体の特殊環境下での破壊の究明と評価法の確立を目指し、接触・転がり損傷^{17),18),19)}、衝突損傷²⁰⁾、熱衝撃損傷²¹⁾、強度信頼性問題などの研究に取り組み、実験および数値応力解析に基づいた理論構築を中心に多数の研究業績を挙げてきた。セラミックスの表面損傷評価では、従来の引張や曲げ強度では統一的な強度評価ができないことを実験および数値応力解析を用いて損傷メカニズム²²⁾を明らかにし、破壊力学の観点から確率論的強度評価法を構築した後、さらに複雑な衝突損傷問題²³⁾へと研究を進め、数多くの工業的のみならず学術的に有意義な研究成果を論文として発表してきた。また、同様にセラミックスの異材接合における製造過程も含めた研究^{24) 25)}や、形状記憶合金の特性評価^{26) 27)}や機能・構造設計に関する研究および独創的な発想に基づく新しい部分軸肥大加工法の開発に関する研究²⁹⁾³⁰⁾などでは、研究視点を材料力学のマクロ的視点に留まらず、材料学のミクロ的視点へと展開した上で、マクロ的視点からの設計概念を構築するなど、常にものづくりを意識するとともに、物理の原則に基づいた新しい材料力学のあり方を示唆してきた。このような研究哲学を以って、産業界や研究・教育機関における他の数多くの研究者が行き詰まってしまうような研究・開発に対しても、他と異なる別な観点から着手し、信頼のある数多くの研究成果を挙げてきた。これらの業績は産業界へ容易に応用・展開できることもあって、これらの研究業績を実用化した設計概念あるいは構造物や製造システムなどが数多くある。これらの業績が高く評価され、数々の技術研究論文賞を戴いている。

2. 代表的な研究業績と工学的功績

上述のような種々の研究業績の中から、①擬脆性固体の様相の破壊を呈する衝撃疲労破壊の研究および②典型的な脆性固体のセラミックスの破壊損傷の研究について取り上げ、研究背景、研究成果お

よび貢献の概要を以下に紹介する.

2. 1 衝撃疲労破壊の研究

電気開閉機器の高圧・大容量化に伴う開閉動作機構の高速化の時代初期においてインパルス衝撃応力の繰返しによる機構・構造部材の疲労破損が頻繁に生じた. それらの破壊の特徴は低サイクル寿命での鋼材, 銅材, アルミニウムなどの金属破壊であるにも関わらず, ほとんど巨視的塑性変形を伴わない極めて脆性的な破面を呈していた. そこで, 矩形波の単一パルスの引張応力を繰返し負荷できる衝撃疲労試験機を開発し, S20C 軟鋼材の平滑材および切欠材に対する衝撃疲労試験により鋼材, 銅材, アルミニウムの衝撃疲労破壊特性における負荷持続時間の依存性および切欠き効果の基本的特性を定量的に明らかにし, 定式化をはかった. また, これらの破面観察によりストライエーション幅と負荷持続時間との関係あるいはストライエーション幅に基づき破壊力学的観点から負荷持続時間依存性も考慮したき裂進展特性を定式化した. さらに, クランク方式および振動モータ型の衝撃疲労試験機により, 引張圧縮の両振り衝撃負荷応力に対する衝撃疲労特性に及ぼす応力比の影響を明らかにし有効負荷時間の導入に基づき定式化して, 実働衝撃負荷応力に対する衝撃疲労強度・寿命の評価法を確立した. 各種構造用炭素鋼 (S10C, S20C, S35C, S45C) および熱処理硬さの異なる S45C 平滑材での低サイクル寿命域, 高サイクル寿命域, 疲労限度域の3領域における衝撃疲労特性に対して, 静的引張による機械的性質(σ_B, ϕ, HV)に基づく確率論的な推定評価法を確立した. また, 繰返し衝撃ねじり疲労試験機の開発により各種構造用炭素鋼での繰返し衝撃ねじり疲労破壊特性も明らかにして定式化をはかり, 電動機軸の起動・停止時における衝撃疲労強度設計に貢献した. さらに, 電極銅材の平滑材に対する常温・高温での衝撃疲労試験により, 低サイクル域での衝撃疲労過程におけるサイクリッククリープ変形挙動および衝撃疲労破壊特性における温度依存性を考慮して定式化をはかり, 真空バルブの電極軸の強度設計法の確立や新しい電極構造開発に大きく貢献した.

一方, 電気開閉機器において不可欠な絶縁構造部材としてエポキシ積層品やエポキシ注形品などのFRP 構造部材がインパルス衝撃応力の繰返しを受けて脆性破面を呈する破損が多発した. そこで, エポキシ積層材およびエポキシ注形材に対する常温・高温での衝撃疲労試験により, これらのFRP 絶縁構造部材の繰返し衝撃応力に対する疲労破壊特性について温度依存性も考慮した破壊確率論的推定評価法を確立し, 各種開閉機器における電気絶縁碍子・碍管・機構要素の実働衝撃荷重に対する構造強度設計や信頼性向上に大きな貢献を果たした.

2. 2 セラミックスの破壊・損傷の研究

典型的な脆性固体であるセラミックスにおいて, 代表的な酸化物系セラミックスのアルミナは電気絶縁特性を活かして各種の送電・配電機器における絶縁構造部材に, 従来より使用されてきたが, 非酸化物系セラミックスが耐熱性, 耐磨性, 耐食性, 軽量性に優れる構造用ファインセラミックス新素材として期待されて, 積極的に開発が進められ, 高効率を目指すガスタービンや自動車エンジン等の高温部品への適用が検討された. この際, セラミックスにおいて, 不可避の欠点である極めて低い靱性と破壊起点となる潜在欠陥を克服できる強度設計法が不可欠となった. そこで, 比較的高い靱性があり耐熱性部材としての期待の大きい Si_3N_4 および高温材料として最も期待される SiC を供試材とし

て種々の強度評価試験を行い、これらのセラミックスの破壊は、前述の衝撃疲労破壊のように有効荷時間を考慮すると、潜在欠陥からの SCG による遅れ破壊をする時間依存型強度で支配され、強度のばらつきは潜在欠陥の形状と大きさおよび部材中の応力分布に基づく有効体積を考慮すると、2 母数ワイブル分布で表すことができることを明らかにした。これらの破壊機構や強度特性の究明に基づき、試験荷様式や試験片の大きさに依存せず、しかも負荷応力の速度や繰返し数も考慮できる統一的評価法を提唱し、常温でのセラミックス評価法を確立した。また、高温での強度特性試験および破面観察に基づき、結晶粒界のガラス相の流動変形が破壊支配型のクリープ破壊強度特性と SCG による遅れ破壊が支配型の破壊強度特性とに分離して、温度依存性を活性化過程の式の導入により考慮すると、高温でのセラミックス強度特性を環境温度も含めて統一的に評価できる方法も確立した。

一方、接触応力を受ける急峻な応力分布場でのセラミックス強度特性は、破壊起点となる潜在欠陥の大きさに依存して破壊に関与する欠陥とその位置が制約される。たとえば、セラミックス球の接触荷重下における接触境界でのヘルツ応力場では、数 μ 以下の大きさの欠陥が破壊起点となり、JIS などの標準的な引張や曲げ評価試験で破壊起点となる大きさの欠陥では破壊せず、それより非常に小さい欠陥を起点としてリングクラックが発生することを破壊力学の概念に基づく解析で明らかにし、実験的に立証している。この概念はセラミックス軸受け球の剥離寿命の評価に大いに貢献している。接触荷重下での圧碎破壊における荷重が極めて大きくなる破壊強度に対しては、モード II の破壊を支配するせん断応力に対して等価な垂直応力に変換する手法で破壊力学的に評価できることを明らかにしている。

これらの評価法はセラミックス実部品の強度設計に適用でき、実機セラミックス部品の形状・寸法や実働負荷での応力分布あるいは環境温度も考慮した強度・寿命に対する確率論的信頼性評価法として多大な貢献ができた。

電気絶縁性や伝熱特性などの機能を利用したセラミックス部品は、いずれの場合も、金属メタライズ接合、活性金属接合あるいは DBC 接合法などの種々の接合法が適用されている。これら部品の破損は接合残留応力によるセラミックスの破壊がほとんど支配的であり、セラミックスの接合強度特性とその評価法が不可欠である。これらの接合残留応力の特徴はセラミックスと金属との熱膨張さに基因する熱応力が接合界面からの急峻な応力分布を呈して残留し、その急峻さの度合やピーク値は接合法の種類や接合条件によって大きな影響を受ける。そこで、活性金属接合の場合において、角柱試験片でのセラミックス/金属接合体の強度に及ぼす接合残留応力および応力緩和用銅板の厚さの影響について残留応力の分布と欠陥寸法を考慮して破壊力学的評価法により明らかにし、セラミックス/金属接合体に対する基本的な強度評価法を確立している。この評価法は接合法の開発や基本強度特性の把握に対して多大な貢献を果たしてきた。

電機・電子の実部品接合構造では、接合部近傍に生じる残留応力は接合試験片の場合と異なり実際には 2 次元あるいは 3 次元変形拘束を受けた多軸残留応力となる。また、使用環境によっては Ag フリーの活性金属ロー材が使用され、Ti-Cu 金属間化合物が生成するロー材の凝固収縮時の影響が残留応力に大きく現れてしまうことが多い。さらには、長時間供用中に対しては中性子の照射によるセラミ

ックスのスウェジングに基因する残留応力の増大が接合部の残存強度や破損寿命の低下に繋がる。そこで、原子炉内での中性子検出器における接合部に対してモデル接合試験片による強度試験と FEM 解析により破壊力学的概念に基づき強度特性および寿命特性を明らかにしている。また、セラミックス円筒と銅板の接合構造体である真空バルブでは、銅板に応力緩和機能を持たせる工夫に対して接合部強度特性に及ぼす銅板厚さの影響を破壊力学的評価により明らかにし、角柱試験片のセラミックス/金属接合体との相違点と類似点を明確にし、破壊力学的評価法が実機接合部品の実用的評価法に適用できることを立証するとともに、接合工程で 2 次元あるいは 3 次元変形拘束を受ける接合構造部品に対する強度設計法に多大な貢献をしている。

産業用機器や自動車用パワーモジュールの半導体基板における回路用銅板と絶縁セラミックス基板 (AlN, Al₂O₃, Si₃N₄) との接合部は DBC 法や活性金属法による接合法が適用され、高信頼性の半導体基板の開発が進められている。この場合も、また、接合残留応力がモジュールの供用中における破損を支配する。そこで、セラミックス基板の材種と 2 種類の接合法の選択的組合せにおける接合残留応力に対して、供用中の熱サイクルによる残留応力の変化を解析し破壊力学的評価を行って、強度寿命信頼性に最適な組合せの接合法についての検討に供した。これにより半導体基板の接合部に着目した強度寿命信頼性の評価に破壊力学的評価法が極めて有益な手法であることも実証された。

3. おわりに

筆者は企業研究技術者の立場から、企業内での新製品開発にあたって生じる克服すべき重要な技術課題の解決型研究に取組まねばならない多くの機会を数多く与えられたが、工業的アプローチによる対症療法的な解決研究が要請されるだけでなく、工学的のみならず科学的アプローチによる普遍性・発展性のある解決研究の機会も何かと与えてもらえた。これらの機会こそが筆者の研究業績の礎となっており、この研究推進にあたっては諸大学の先生方々の温かいご指導ご鞭撻のお蔭であると感謝しております。大学転出後における教育研究者の立場からの研究では、企業研究の経験を活かして愛媛大学地域共同研究センターでの産学連携研究として、数多くの企業との先端研究や地場産業との共同研究を通し、企業での製品・技術開発や製品信頼性向上に貢献でき、また、これらの技術開発に対する科学的アプローチ研究の深耕を図ることができるようになり、愛媛大学ならびに多くの企業におけるご協力者の方々に厚く御礼申し上げます。

このたび、筆者が日本機械学会材料力学部門における非常に荣誉ある功績賞として標題のような功績賞を戴けるに至ったのも、諸大学・研究機関ならびに企業の方々のご支援の賜物であると深謝する次第でございます。

4. 引用文献

- 1) 繰り返し衝撃荷重に対する構造用炭素鋼の疲労強度についての破壊確率論的推定, 岡部永年, 矢野利行, 森 忠夫, 材料, Vol.30, No.328, pp.28~33, 昭和 56 年 1 月
- 2) 繰り返し衝撃荷重に対するエポキシ樹脂積層材の衝撃疲労強度とその信頼性 岡部永年, 矢野利行, 鎌田 功, 森 忠夫, 材料, Vol.31, No.351, pp. 1210~1216, 昭和 57 年 12 月

- 3) Impact Torsional Fatigue Structural Carbon Steels, N.Okabe, T.Yano, T.Uchida, T.Mori, Bulletin of JSME, Vol.27, No.231, pp.1813~1820, (1984)
- 4) 繰り返し衝撃荷重下の銅材の衝撃疲労強度とその疲労過程でのサイクリッククリープによる塑性変形挙動, 岡部永年, 矢野利行, 森 忠夫, 材料, Vol.33, No.372, 昭和 59 年 9 月, pp.1186~1192
- 5) 構造用炭素鋼の衝撃ねじり疲労強度, 岡部永年, 矢野利行, 内田 猛, 森 忠夫, 日本機械学会論文 文集 (A編) 第 50 卷 449 号, pp.41~49, 昭和 59 年 1 月
- 6) セラミックスの衝撃破壊強度特性と確率的評価, 岡部永年, 矢野利行, 平田英之, 村松正光, 米屋 勝利, 材料, Vol.37, No.423, pp.54~60, 昭和 63 年 12 月
- 7) セラミックスの強度特性評価と信頼性, 岡部永年, 伊藤洋茂, 平田英之, 村松正光, 材料, Vol.36, No.408, pp.1012~1017, 昭和 62 年 9 月
- 8) セラミックスの破壊強度特性と統一的评价, 岡部永年, 矢野利行, 村松正光, 浜田晴一, 材料, Vol.38, No.430, pp.783~788, 平成 1 年 7 月
- 9) セラミックス強度の統一的评价と信頼性設計への適用の検討, 岡部永年, 矢野利行, 村松正光, 材 料, Vol.39, No.439, pp.393~39, 平成 2 年 4 月
- 10) 常圧焼結窒化珪素の高温破壊強度特性の統一的评价法, 岡部永年, 平田英之, 材料, Vol.40, No.457, pp.1341~1347, 平成 3 年 10 月
- 11) Strength evaluation method and design optimization for ceramic gas turbine blades, N.Okabe, T.Ikeda, Materials Science and Engineering, A143, pp 11-19, (1991)
- 12) セラミックスの材料開発・適用研究における信頼性評価・解析の動向, 岡部永年, 日本機械学会 論文集, Vol.61, No.589, pp.2~9, (1995)
- 13) 各種アルミニウム熱延上がりストリップの変形抵抗の推定, 岡部永年, 矢野利行, 有井 満, 森 忠 夫, 塑性と加工, Vol.16, No.174, pp.566~571, (1975)
- 14) ガスタービン静翼材の熱疲労き裂シミュレーションによる寿命評価, 藤山一成, 岡部永年, 村上 格, 吉岡洋 明, 日本ガスタービン学会誌, Vol.19, No.76, pp.78~84, (1992)
- 15) ガスタービン燃焼器用材料 Ni 基 Hastelloy X の析出形態, 機械的性質に及ぼす長時間時効の影響, 吉 岡洋明, 斉藤大蔵, 藤山一成, 岡部永年, 中村新一, 鉄と鋼, Vol.73, No.11, pp.77~82, (1993)
- 16) Ni 基超合金 IN 7 3 8 LC の機械的性質に及ぼす材料劣化の影響, 岡部永年, 吉岡洋明, 斉 藤大蔵, 藤山一成, 日本ガスタービン学会誌, Vol.22, No.85, pp.63~68, (1994)
- 17) セラミックス軸受用窒化珪素球の圧砕強度の球径依存性, 市川昌弘, 岡部永年, 阿部 豊, 材料, Vol.40, No.457, pp.1348~1354, 平成 3 年 10 月
- 18) 岡部永年, 高橋学, 森澤希, 伊藤洋茂, 小球衝突に対するセラミックス部材の破壊形態と強度特性につ いて, 日本機械学会論文集 A 編, 第 66 卷 649 号, pp. 110-116, (2000)
- 19) セラミックス軸受球のリングクラックの発生強度に対する抜き取り検査方法の検討, 阿部豊, 市川昌弘, 岡部 永年, 日本機械学会論文集(A編)第 61 卷 589 号, pp.22~27, (1995-9)
- 20) 小球衝突試験装置の試作とセラミックスの破壊強度評価, 伊藤洋茂, 岡部永年, 日本機械学会論文集 (A 編) 第 60 卷 570 号, pp.100~105, (1994-2)
- 21) セラミックスの熱衝撃疲労抵抗性の確率論的评价, 佐久間俊雄, 岩田宇一, 岡部永年, 日本機械 学会論文集 (A編) 第 61 卷 589 号, pp.16~21, (1995-9)
- 22) 接触荷重に対するセラミックスの強度とばらつき, 岡部永年, 阿部 豊, 市川昌弘, 高松 徹, 菅則雄, 材料, Vol.47, No.12, pp.1251-1257, (1998-12)
- 23) Ni 基超合金 IN 3 7 8 LC の衝突損傷に及ぼす材料劣化 の影響, 伊藤洋茂, 岡部永年, 日本機 械学会論文集 (A編) 第 60 卷 580 号, pp.134~139, (1995-1)
- 24) セラミックス/金属接合体の強度信頼性-接合冷却過程での熱残留応力および残留応力挙動における基礎 的検討, 岡部永年, 朱霞, 広部広太, 中橋昌子, 材料, 49, 4, pp.461~467, (2000-4)
- 25) Reliability of Strength and Long-Term Life for Ceramics/Metal Jointing Parts under Neutron Irradiation, Nagatoshi OKABE, Xia ZHU, Manabu TAKAHASHI and Masako NAKAHASHI, MSRI, Vol.8, No.3, pp.101-108, (2002-9)
- 26) A New Constitutive Equation for Superelastic Deformation and Prediction of Martensite Volume Fraction in Titanium-Nickel-Copper Shape Memory Alloy, JMaho Hosogi, Nagatoshi Okabe, Toshio Sakuma, and Keisuke Okita, JIM., pp.822-827, (2002-5)
- 27) A New Fatigue Model for Titanium-Nickel-Copper Shape Memory Alloy Subjected to Cyclic Superelastic Deformation, Nagatoshi Okabe, Maho Hosogi, Toshio Sakuma, and Keisuke Okita, JIM. pp.809-814, (2002-5).
- 28) 環状構造物用補修締結 SMA リング肉厚の最適化における基礎的検討, 沖田圭介, 岡部永年, 細木 真保, 佐久間俊雄, 山内清, 日本材料学会, Vol.53.No.1, pp.64-69, (2004-1)

- 29) 新しい発想による部分軸肥大加工法の開発，浦忠，岡部永年，朱霞，塑性と加工，Vol.44,No.514,pp.45-49,(2003-11)
- 30) 中空丸棒軸材への部分軸肥大加工法の適用，岡部永年，朱霞，森一樹，井浦忠，塑性と加工，Vol.46,No.533, pp.90-94,(2005-6)

出版物

- 1) 「最適設計ハンドブック」(朝倉書店，2003)
- 2) 「ファインセラミックス技術ハンドブック」(内田老鶴圃，1998)
- 3) 「JIS ファインセラミックス多孔体の破壊靱性試験方法」(JIS R 1615, 1995)
- 4) 「JIS ファインセラミックス多孔体の曲げ強さ試験方法」(JIS R 1615, 1995)
- 5) 「Cyclic Fatigue in Ceramics」(ELSEVIER, 1995)
- 6) 「疲労設計便覧」(養賢堂，1995)
- 7) 「JIS ファインセラミックスの高温・高圧環境適性試験方法」(JIS R 1615, 1995)
- 8) 「先進セラミックス(基礎と応用)」(日刊工業新聞社，1994)
- 9) 「機械・構造物の安全性(信頼性工学の実際的应用)」(日本機械学会編，丸善，1988)
- 10) 「機械・構造系技術者のための実用信頼性工学」(養賢堂，1987)

学会賞等受賞

- 1) 日本材料学会論文賞受賞：昭和 58 年 5 月 24 日 (1982 年)，「鋼材の衝撃疲労強度と寿命予測」,Proceeding of The 24th Japan Congress on Materials Research,1981,pp.134～140
- 2) 日本ガスタービン学会論文賞受賞：平成 6 年 4 月 22 日，「ガスタービン静翼材の熱疲労き裂シミュレーションによる寿命評価」，日本ガスタービン学会誌，Vol.19,No.76(1992)pp.78～84
- 3) 日本火力・原子力協会学術論文賞受賞：平成 9 年 11 月 (1997 年)，「低圧ロータの腐食寿命評価法」火力原子力発電，Vol.147,No.473,1996,pp.36～42
- 4) 日本ガスタービン学会論文賞受賞：平成 10 年 6 月 (1998 年)，「ガスタービントランジションピースの劣化・損傷予測法の検討」日本ガスタービン学会誌,Vol.23,No.91, (1995) pp.66～72
- 5) ECF-13 CONFERENCE AWARDS: Strength Estimation of Ceramic/Metal Jointing of Various interlayer Thickness,Vol.No.12,December 2000
- 6) 日本機械学会中国四国支部，技術創造賞：平成 14 年 3 月 (2002 年)
- 7) 日本機械学会フェロー：平成 15 年 3 月 (2003 年)
- 8) 日本材料学会信頼性工学部門，功績賞，平成 16 年 5 月 (2004 年)
- 9) 日本塑性加工学会論文賞，平成 17 年 5 月 (2005 年)「新しい発想による部分軸肥大加工法の開発」塑性と加工，Vol.44,No.514,pp.45-49
- 10) 日本機械学会，材料力学部門賞，平成 18 年 8 月 (2006 年)