

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 21 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23360301

研究課題名(和文) 設計指導原理に基づくTiAl基鍛造合金のき裂進展特性と高靱性化

研究課題名(英文) Crack Propagation Properties and Toughening of Wrought TiAl Alloys based on Our Design Principle

研究代表者

竹山 雅夫 (Takeyama, Masao)

東京工業大学・理工学研究科・教授

研究者番号：30251622

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,700,000円、(間接経費) 4,410,000円

研究成果の概要(和文)：ラメラ組織を有するTiAl基合金の靱性及び強度に及ぼすラメラ方位及び β -Ti相の影響を、単結晶及び多結晶合金を用いて系統的に調べた。単結晶の実験から、ラメラ組織におけるき裂発生及び伝播は、応力軸方向と平行なせん断成分を持つラメラ方位に強く依存し、高靱性化はこの成分を最小化する組織制御によって図れる。我々の組織設計指導原理に基づいて溶製した多結晶合金の実験から、ラメラ粒界 β -Ti相の存在は塑性変形によりき裂の伝播抵抗として作用し、靱性向上に有効である。その合金のクリープ強度は現用のNi基合金と同程度となり、 β 相はクリープ強度を低下させる因子ではなく、組織の安定性がクリープ強度の支配因子である。

研究成果の概要(英文)：The effects of lamellar orientation and presence of β -Ti phase on toughening and strengthening of TiAl alloys with lamellar microstructure using single and polycrystalline materials were systematically investigated. From the single crystal experiments, crack initiation and propagation behavior depends strongly on the lamellar orientation with shear component parallel to the loading direction, and toughening can be achieved by minimizing the component. From the polycrystalline experiments based on our design principle of the wrought alloys, the β phase present on the lamellar colony boundaries is deformable and resistant to crack propagation, thereby effective in toughening. The creep strengths of the alloys were found to be comparable to the currently used Ni-based alloys. Thus, it is not the presence of β phase but microstructure stability during creep that governs the creep strength.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：材料工学・構造・機能材料

キーワード：ラメラ組織 き裂 靱性 吸収エネルギー β -Ti相 伝播抵抗 クリープ 組織制御

1. 研究開始当初の背景

TiAl 基合金は、軽量かつ優れた高温強度を有することから、主に航空機エンジンにおける Ni 基超合金の代替材料として、1980 年代より研究が行われてきた。2006 年には米国 GE 社が、TiAl 基鋳造合金の民間機エンジン低圧タービン最終段動翼への適用を決定し、2011 年よりその運用が開始された。

また、2000 年代中盤以降は、環境問題に対する意識の高まりと燃料価格の高騰に起因して、特に欧州で TiAl 基合金の用途拡大の機運が高まり、その有効な手段として鍛造合金が注目され始めていた。鍛造性と高靱性を両立する合金設計指導原理を申請者が報告し、その実証を継続して行なってきたことが、欧州における鍛造 TiAl 基合金研究活性化の発端となったことは間違いない。しかし一方で、日本における TiAl 研究の activity は低く、我が国にて見出された研究成果が欧米に独占されかねない状況にあった。

今後さらに拡大するであろう TiAl の分野を我が国がリードし続けるためにも、航空機エンジンへの適用上最も重要な課題となるき裂進展特性の更なる向上の研究を行なう必要がある。そこで、指導原理に基づき鍛造し、かつラメラ組織に制御した TiAl 基合金において、以下に示す 3 つのテーマについて研究を行なった。

2. 研究の目的

本研究では、申請者が提案した鍛造 TiAl 基合金の設計指導原理をさらに発展させ、以下の 3 つの研究課題を通して鍛造合金の高靱性化に資する組織の影響を明らかにする：

(1) 高靱性化にとって重要な組織因子であるラメラ組織そのものに着目し、種々のラメラ方位を有する TiAl 単結晶の 3 点曲げ試験における破壊挙動のその場観察を行ない、き裂発生・伝播特性に及ぼすラメラ方位の影響及び α_2 板の役割について検討する。

(2) ラメラ組織に意図的に β 相を分散させた試料を準備し、その曲げ試験及び引張試験のその場観察を行い、き裂の伝播に及ぼす β 相の影響を検討する。

(3) β 相の平衡体積率が異なる試料のクリープ試験を行い、一般的に強度を低下させると見なされている β 相のクリープ特性に及ぼす影響を明確にする。

3. 研究の方法

(1) においては、光学式浮遊帯域熔融法を用いて、 γ/γ 及び α_2/γ ラメラ組織となる単結晶合金 (Ti-48Al-8Nb および Ti-48Al (at.%)) を作成し、種々の方位の短冊状試験片を切出し 3 点曲げ試験片を行なった。(2) 及び (3) においては、高周波スカル溶解にて大型インゴットに溶製後、熱間自由鍛造した Ti-Al-V 及び Ti-Al-V-Nb 合金から曲げ、引張及びクリープ試験を切り出した。靱性の評価には、独自に開発した SEM 内曲げ試験機及び SEM 内引張

試験機を用い、SEM による変形・破壊挙動のその場観察を行なった。クリープ試験は大気中 1073 K にて行ない、クリープ速度を作用トランス (LVDT) を用いてモニタリングした。

4. 研究成果

(1) き裂進展に及ぼすラメラ組織及びそのラメラ方位の影響

γ/γ 及び α_2/γ 組織からなる短冊状試験片 (厚さ 1.8 mm, 幅 4.0 mm, 長さ 30 mm) の板厚の 4 割まで切欠きを導入し、その板厚方向および板幅方向とラメラ界面との成す角度をそれぞれ θ , λ と定義して、種々のラメラ方位を有する試料について曲げ試験を行ない、荷重-変位曲線の (θ , λ) 依存性を調べた (図 1)。その結果、 $\lambda < 10^\circ$ の試料 (A, B) では、荷重は最大値を示した直後に急激に低下し、その後は変位の増加に伴い緩やかに減少し、破断に至るのに対し、 λ が約 30° の試料 (C, D) では、 θ が 0° 近傍であっても、荷重は最大値に達した後の急激な低下は示さず、緩やかに減少し、破断することを見出した。特に、 α_2/γ 2 相ラメラ組織 (D) は、顕著な加工硬化挙動を示すことも明らかにした。

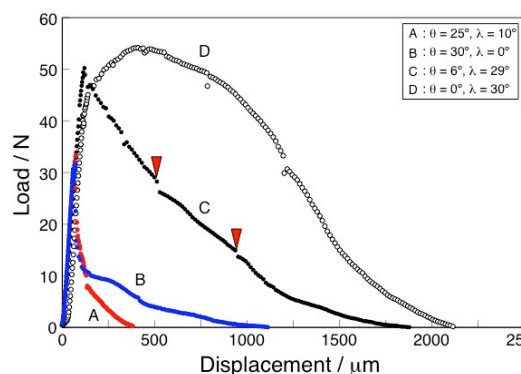


図 1 種々のラメラ方位を持つ試料の荷重-変位曲線

その場観察から、 λ が 30° 以上の値を持つ試料 (C, D) においては、ラメラ界面を横切る顕著なすべり線が認められ、塑性変形によってき裂伝播抵抗は増大すること、また、その効果は α_2 板の存在によってさらに増大することを見出した。

得られた荷重-変位曲線の面積から吸収エネルギー (E_t) を求め、その θ, λ 依存性を調べた (図 2)。その結果、 θ が 0° 近傍の試料 C ($6^\circ, 29^\circ$) の E_t は 31.2 mJ となり、 E_t は θ が一定の場合、 λ の値に強く依存し、 λ が約 45° 近傍で最大値を示すこと、しかし、 E_t は θ にも依存し、 θ の増加に伴って一旦減少するが、その後増大することを見出した。特に α_2 板を含む ($82^\circ, 42^\circ$) の試料の E_t は 131 mJ ~ 180 mJ まで増大し、 α_2 板の存在は靱性の改善に有効であることを明らかにした。ここで、き裂がラメラ界面に沿って発生伝播する場合、その変

位様式は、Mode I（き裂開口変位）、Mode II（ラメラ面に平行な試験片厚さ方向への変位）、Mode III（ラメラ面に平行な試験片幅方向への変位）の3種類であり、Mode IIIはき裂進展方向の成分を持たないのに対し、Mode IIはき裂進展方向の成分を有する。したがって、 θ の増加に伴う E_I の減少は、Mode IIの導入に起因し、その後の増大は、Mode IIの効果が再び減少するためであると推察した。

以上より、TiAl 合金の高靱性化には、熱力学的に安定な α_2 相を有し、且つ Mode II の作用を最小化させる組織制御が重要となると結論した。

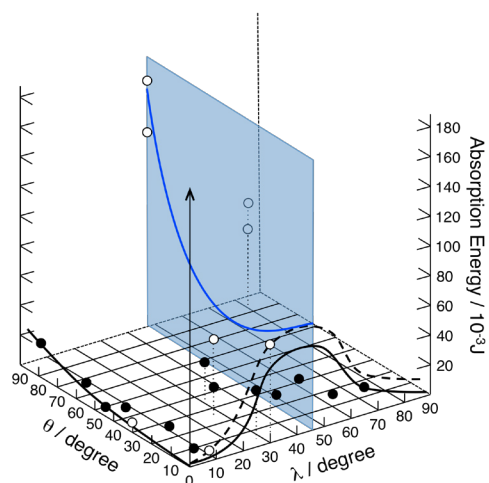


図2 吸収エネルギーのラメラ方位依存性。

(2) き裂進展に及ぼす β 相の影響

鍛造 TiAl 合金 (Ti-42Al-8V (at%)) を用いて、我々がこれまでに構築した組織設計指導原理から、ほぼラメラ粒からなる組織 (FL) とした試料及びそのラメラコロニー粒界に β -Ti 相を存在させた組織 (FL+CB β) をもつ試料の2種類を準備して、(1)と同様の手法を用いて、曲げ試験を行なった。その結果、吸収エネルギー E_I は、FL 材に比べて、FL+CB β 材の方が大きくなることを見出した (図3)。また、その場観察から、コロニー境界に存在する β 相中には、その β 相を挟む二つの粒のラメラ方位が殆ど変化しない場合においても、明瞭なすべり線が存在し、塑性変形していることを見出した (図4)。

さらに、新たに開発した SEM 内引張試験機を用いて、コロニー境界上での β 相の亀裂進展に及ぼす効果を調べた結果、引張変形下においても方位差の小さいラメラ粒界上の β 相中には明瞭なすべり線が認められることを明らかにした (図5)。

以上のことから、 β 相は亀裂の伝播抵抗として有効に作用し、破壊靱性を向上させること、特に、その効果は、ラメラ方位の差が小さいコロニー境界において顕著に作用することを見出した。

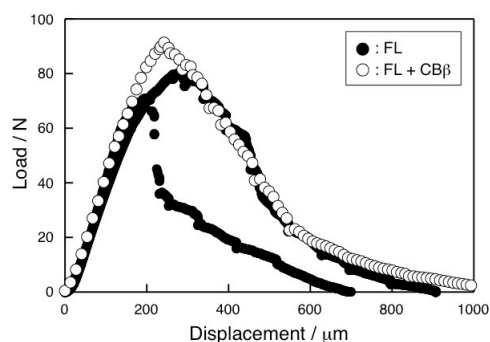


図3 種々の組織を有する試料の曲げ試験によって得られた荷重-変位曲線。

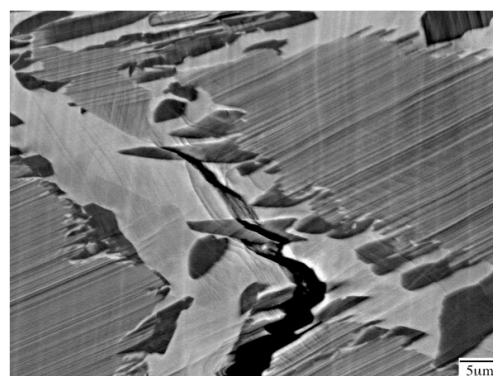


図4 ラメラコロニー粒界に β 相を持つ試料 (FL+CB β 材) の曲げ試験によるき裂先端のその場観察組織。

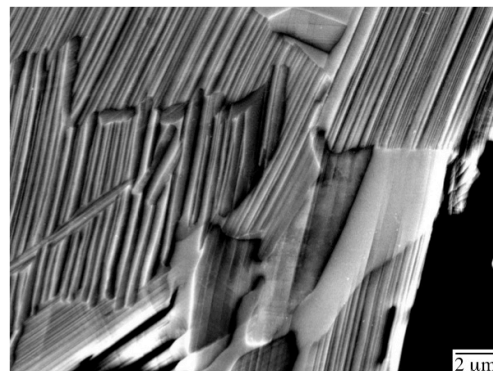


図5 図4と同一試料の引張試験における破断面近傍のき裂のその場観察組織。

(3) クリープ特性に及ぼす β 相及びラメラ組織の効果

我々が構築した組織設計指導原理に基づき、初期組織を α_2/γ ラメラ組織とし、且つ、試験温度 1073 K にて $\beta+\gamma$ 2相となる Ti-42Al-8V 及び $\alpha+\beta+\gamma$ 3相となる Ti-43Al-5V-4Nb 鍛造合金を用いて、クリープ特性に及ぼす組織安定性の効果を調べた。その初期組織を図6に示す。いずれもラメラ組織であり、その体積率 (V_V) は約 90 %である。等軸ラメラ粒径は、前者は約 70 μm 、後者は約 100 μm である。なお、両試料ともラメラ

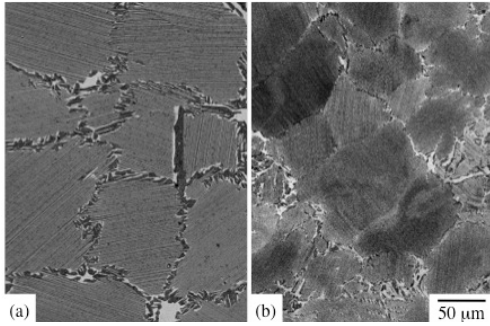


図6 クリープ試験前の組織: (a) Ti-42Al-8V, (b) Ti-43Al-5V-4Nb.

粒界に僅かにβ相及びγ粒が存在する。

両合金ともクリープの大半は加速域となり、加速の程度はTi-42Al-8Vの方が大きい。破断時間は、Ti-42Al-8Vでは1126 h、一方、Ti-43Al-5V-4Nbでは1896 hと約2倍に延長する(図7)。

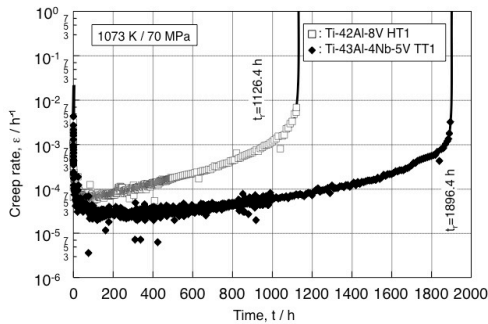


図7 組織安定性の異なる2合金のクリープ速度-時間曲線。

破断材の組織観察から、何れの合金も、クリープ中に粒界反応型の $\alpha+\gamma \rightarrow \beta+\gamma$ 相変態が進行し、ラメラ組織は粒界から粒内に向かって粒状のβ相とγ相からなる2相組織へと変化する。しかし、その変化の程度は、前者の方が顕著となる(図8)。また、この相変態はひずみの導入によって加速されることも見

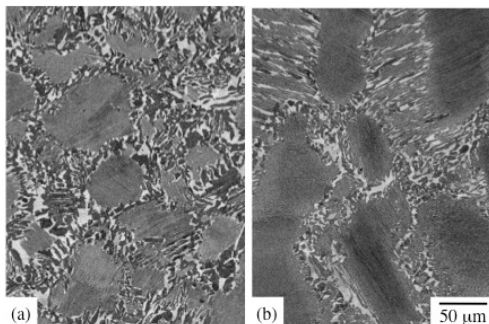


図8 クリープ破断材の反射電子像 (a) Ti-42Al-8V, (b) Ti-43Al-5V-4Nb.

出した。

本合金のクリープ強度を現用のジェットエンジン用合金 (IN718, U720Li) と比較すると、Ti-42Al-8Vの比強度はIN718のそれよりも高く、また、ラメラ組織の安定性を高めたTi-43Al-5V-4NbはU720Liよりも優れた強度を示すことを見出した(図9)。

以上の結果から、本合金は何れも使用温度において相当量のβ相を有するにも関わらず、そのクリープ比強度は現用のIN718, U720Liと遜色ない。したがって、クリープの加速は、必ずしもβ相の存在によるものではなく、相変態の進行による組織の不安定性の程度に起因することを明らかにした。

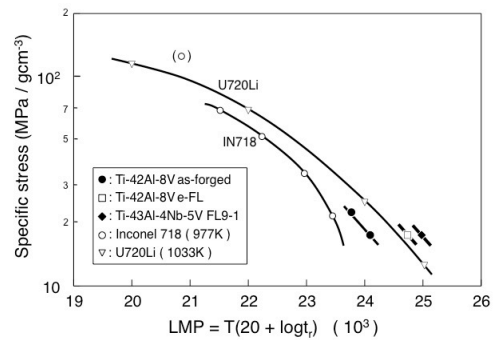


図9 本合金と他の合金 (In718, U720) との Larson-Miller Plot によるクリープ強度の比較

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計11件)

1. 中島広豊, 橋本清, 竹山雅夫: Ti-Al-M 3元系におけるβ-Ti相の相安定性の計算による再現, 学振耐熱金属材料第123委員会研究報告, 55[1], pp. 73-82, 2014年, 査読無
2. 竹山雅夫, 中島広豊: TiAl基合金の実用化に向けた最近の動向, 学振耐熱金属材料第123委員会研究報告, 54[3], pp. 373-382, 2013年, 査読無
3. 中島広豊, 竹山雅夫: β相安定化元素を複合添加したTiAl基合金の1473 Kにおける相平衡, 学振耐熱金属材料第123委員会研究報告, 54[2], pp. 207-214, 2013年, 査読無
4. Y. Imai, T. Kikugawa, M. Takeyama: Cracking Behavior and Toughness of Lamellar Microstructure in Gamma TiAl Alloys for Jet Engine Application, Abstract Book of The 4th Joint Symposium Material Science and Engineering of Dalian University of Technology & Department of Metallurgy of Tokyo Institute of Technology, 1, 19-21, 2012, 査読無
5. 今井佑治, 菊川敏一, 竹山雅夫: γ/γ界面からなるTi-48Al-8Nbフルメラ単結

- 晶のき裂発生・伝播挙動とその方位依存性, 学振耐熱金属材料第 123 委員会研究報告, 53[2], pp.163-174, 2012, 査読無
6. 菊川敏一, 今井佑治, 竹山雅夫: 種々の方位を有する Ti-47.5Al フルラメラ単結晶の SEM 内曲げ試験のその場観察によるき裂伝播挙動, 学振耐熱金属材料第 123 委員会研究報告, 53[1], pp. 59-70, 2012, 査読無
 7. 久布白圭司, 高橋聰, 竹山雅夫: TiAl 合金の高温圧縮特性に及ぼす β -Ti 相の影響, 学振耐熱金属材料第 123 委員会研究報告, 52[3], pp. 281-288, 2011, 査読無
 8. 中島広豊, 竹山雅夫: β -Ti 相を利用した鍛造 TiAl 基合金の曲げ試験によるき裂発生・伝播のその場観察と靱性, 学振耐熱金属材料第 123 委員会研究報告, 52[3], pp. 281-288, 2011, 査読無
 9. S. Mayer, C. Sailer, T. Schmoelzer, T. Lippmann, P. Staron, H. Clemens, M. Takeyama: On Phase Equilibria and Phase Transformations in β/γ -TiAl Alloys – A Short Review, BHM, Springer-Verlag 2011, 156, pp. 438-442, 2011, 査読有
 10. S. Mayer, C. Sailer, H. Nakashima, T. Schmoelzer, T. Lippmann, P. Staron, K-D. Liss, H. Clemens, M. Takeyama: Phase Equilibria and Phase Transformations in Molybdenum-Containing TiAl Alloys, MRS Symposium Proceedings, 1295, pp. 113-118, 2011, 査読有
 11. Y. Mine, H. Fujisaki, M. Matsuda, M. Takeyama, K. Takashima: Micro-tension behaviour of TiAl polysynthetically twinned crystals with 0° and 90° -orientated lamellae, Scripta Materialia, 65, pp. 707-710, 2011, 査読有

[学会発表] (計 39 件)

1. 中島広豊, 竹山雅夫: β 相安定化元素を複合添加した Ti-Al-M₁-M₂ 4 元系の実験及び計算状態図, 日本金属学会第 154 回春期講演大会, 2014 年 3 月 23 日, 東京工業大学
2. 臼井慎, 中島広豊, 竹山雅夫: 引張試験のその場観察による TiAl 基合金の変形挙動における β -Ti 相の役割, 日本金属学会第 154 回春期講演大会, 2014 年 3 月 23 日, 東京工業大学
3. 若林英輝, 臼井慎, 中島広豊, 高田尚記, 竹山雅夫: β -Ti 相を利用した鍛造 TiAl 基合金のクリープに及ぼす組織の影響, 日本鉄鋼協会第 167 回講演大会, 2014 年 3 月 22 日, 東京工業大学
4. 中島広豊, 橋本清, 竹山雅夫: Ti-Al-M 3 元系における β -Ti 相の相安定性の計算による再現, 学振耐熱金属材料 123 委員会研究報告会, 2014 年 3 月 3 日, 東京工業大学
5. S. Usui, H. Nakashima, J.H. Perepezko, M. Takeyama: Phase stability of multi component TiAl based alloys for application to compressor blades of aircraft engine, The 2nd International Education Forum on Environment and Energy Science, 2013 年 12 月 14 日, Hyatt Regency Huntington

Resort and Spa

6. 竹山雅夫, 中島広豊: TiAl 基合金の実用化に向けた最近の動向, 学振耐熱金属材料第 123 委員会研究報告会, 2013 年 11 月 12 日, 東京工業大学
7. H. Nakashima, M. Takeyama: Phase equilibria among beta, alpha (alpha2) and gamma phases in Ti-Al-M1-M2 quaternary systems at elevated temperature, Intermetallics 2013, 2013 年 10 月 4 日, Education center Kloster Banz, Germany
8. S. Takahashi, K. Kubushiro, M. Takeyama: The effect on initial microstructure on the forgeability in beta contained TiAl alloy, Intermetallics 2013, 10 月 4 日, Education center Kloster Banz, Germany
9. 中島広豊, 竹山雅夫: Ti-Al-Nb 3 元系の $\beta/\alpha/\alpha_2/\gamma$ 相間における実験及び計算状態図, 日本金属学会第 153 回秋期講演大会, 2013 年 9 月 19 日, 金沢大学
10. 臼井慎, 中島広豊, 竹山雅夫: TiAl 基合金の $\beta/\alpha/\gamma$ 相間の相安定性に及ぼす Nb と V の複合添加の影響, 日本金属学会第 153 回秋期講演大会, 2013 年 9 月 19 日, 金沢大学
11. 中島広豊, 竹山雅夫: β 相安定化元素を複合添加した TiAl 基合金の 1473 K における相平衡, 耐熱金属材料 123 委員会研究会, 2013 年 7 月 9 日, 東京工業大学
12. K. Kubushiro, S. Takahashi, M. Takeyama: Effect of heat treatment on mechanical properties of forged Ti-43Al-5V-Nb alloy, Gamma Alloy Technology International Workshop, 2013 年 6 月 14 日, Toulouse, France
13. H. Nakashima, M. Takeyama: Effect of V/Nb Combined Addition on Stability of beta-Ti Phase in TiAl alloy, Gamma Alloy Technology International Workshop, 2013 年 6 月 14 日, Toulouse, France
14. M. Takeyama: In-situ Observation of Cracking in Gamma Lamellar Alloy, Gamma Alloy Technology International Workshop, 2013 年 6 月 13 日, Toulouse, France
15. 臼井慎, 竹山雅夫: β 相を利用して組織制御した TiAl 基合金の引張変形のその場観察, 日本鉄鋼協会第 165 回講演大会, 2013 年 3 月 28 日, 東京電機大学
16. 中島広豊, 竹山雅夫: V と Nb を複合添加した TiAl 基合金における β -Ti 相の相安定性, 日本金属学会第 152 回講演大会, 2013 年 3 月 27 日, 東京理科大学
17. H. Nakashima, M. Takeyama: The Role of Colony Boundary β -Ti Phase in Toughening Wrought TiAl Alloys, The 1st International Education Forum on Environment and Energy Science, 2012 年 12 月 16 日, Waikoloa Beach Marriott Resort
18. T. Kikugawa, Y. Imai, M. Takeyama: In-situ Observation of Cracking Behavior in Ti-47.5Al Lamellar Single Crystal, 2012 MRS Fall Meeting & Exhibit, 2012 年 11 月 26 日, Hynes Convention Center
19. K. Kubushiro, S. Takahashi, Y. Masuda, M. Takeyama: Effect of Microstructure on

- Mechanical Properties in Wrought TiAl Alloy, 2012 MRS Fall Meeting & Exhibit, 2012年11月26日, Hynes Convention Center
20. Y. Imai, T. Kikugawa, M. Takeyama : Cracking Behavior and Toughness of Lamellar Microstructure in Gamma TiAl Alloys for Jet Engine Application, The 4th Joint Symposium Materials Science and Engineering of Dalian University of Technology & Department of Metallurgy of Tokyo Institute of Technology, 2012年9月5日, Dalian University of Technology
 21. 中島広豊, 竹山雅夫, TiAl 基合金における β -Ti 相の相安定性に及ぼす V と Nb の相互作用, 日本金属学会 151 回講演大会, 2012年9月19日, 愛媛大学
 22. 久布白圭司, 増田靖子, 高橋聡, 竹山雅夫 : TiAl 基合金の高温圧縮特性に及ぼす圧縮温度の影響, 日本金属学会 151 回講演大会, 2012年9月19日, 愛媛大学
 23. 今井佑治, 菊川敏一, 竹山雅夫 : TiAl 基フルメラ単結晶合金のき裂の発生および伝播に及ぼす α_2 板の効果, 日本金属学会 151 回講演大会, 2012年9月19日, 愛媛大学
 24. 今井佑治, 菊川敏一, 竹山雅夫 : γ/γ 界面からなる Ti-48Al-8Nb フルメラ単結晶のき裂発生・伝播挙動とその方位依存性, 学振耐熱金属材料第 123 委員会研究報告会, 2012年7月9日, 東京工業大学
 25. M. Takeyama : Design Concept for Toughening using β -Ti phase in Wrought Gamma TiAl Alloys, Gamma Alloy Technology 2012, 2012年6月8日, Beijing
 26. K. Kubushiro, S. Takahashi, M. Arai, M. Takeyama : Effect of β -Ti phase on hot deformability of TiAl alloys, Gamma Alloy Technology 2012, 2012年6月8日, Beijing
 27. Y. Imai, T. Kikugawa, M. Takeyama : In-situ Observation of Cracking Behavior of γ/γ Lamellar Single Crystal in Ti-48Al-8Nb, Gamma Alloy Technology 2012, 2012年6月6日, Beijing
 28. H. Nakashima, M. Takeyama : Cracking Behavior in β /Lamellar Microstructure of Wrought TiAl Alloys, Gamma (TiAl) Alloy Technology 2012, 2012年6月6日, Beijing
 29. 菊川敏一, 今井佑治, 竹山雅夫 : TiAl 基フルメラ単結晶のき裂発生・伝播挙動に及ぼす方位及び α_2 板の影響, 日本金属学会第 150 回講演大会, 2012年3月30日, 横浜国立大学
 30. 中島広豊, 竹山雅夫 : TiAl 基合金における β 相の生成に及ぼす V, Nb 複合添加の効果, 日本金属学会第 150 回講演大会, 2012年3月30日, 横浜国立大学
 31. 藤崎秀俊, 松田光弘, 高島和希, 峯洋二, 竹山雅夫 : TiAl 基合金の引張挙動のその場観察, 日本金属学会第 150 回講演大会, 2012年3月28日, 横浜国立大学
 32. 菊川敏一, 今井佑治, 竹山雅夫 : 種々の方位を有する Ti-47.5Al フルメラ単結晶の SEM 内曲げ試験その場観察によるき裂伝播挙動, 学振耐熱金属材料第 123 委員会研究報告会, 2012年3月5日, 東京工業大学
 33. 久布白圭司, 高橋聡, 竹山雅夫 : TiAl 基合金の高温圧縮特性に及ぼす β -Ti 相の影響, 学振耐熱金属材料第 123 委員会研究報告会, 2011年11月30日, 東京工業大学
 34. 藤崎秀俊, 松田光弘, 高島和希, 峯洋二, 竹山雅夫 : Ti-48 %Al PST 結晶におけるマイクロ引張挙動, 日本金属学会 149 回講演大会, 2011年11月8日, 沖縄
 35. 中島広豊, 竹山雅夫 : 鍛造 TiAl 基合金の靱性に及ぼす粒界 β 相の影響, 日本金属学会 149 回講演大会, 2011年11月7日, 沖縄
 36. 今井佑治, 竹山雅夫, γ/γ 界面から構成される TiAl 基フルメラ単結晶合金のき裂発生・伝播のその場観察, 日本金属学会 149 回講演大会, 2011年11月7日, 沖縄
 37. M. Takeyama, Y. Imai, T. Kikugawa : In-situ observation of cracking behavior and toughening in wrought TiAl alloys, 4th International Workshop on Titanium Aluminides, 2011年9月14日, Numenberg
 38. K. Kubushiro, S. Takahashi, K. Morishima, M. Arai, Masao Takeyama, Effect of microstructure on hot deformability of TiAl alloys, 4th International Workshop on Titanium Aluminides, 2011年9月14日, Numenberg
 39. 中島広豊, 竹山雅夫 : β -Ti 相を利用した鍛造 TiAl 基合金の曲げ試験によるき裂発生・伝播のその場観察と靱性, 学振耐熱金属材料第 123 委員会研究報告会, 2011年7月12日, 東京工業大学
6. 研究組織
- (1) 研究代表者
竹山 雅夫 (TAKEYAMA MASAO)
東京工業大学・大学院理工学研究科・教授
研究者番号 : 30251622
 - (2) 研究分担者
なし
 - (3) 連携研究者
なし