

形状記憶合金の開発動向と展望

宮崎 修一*

1. はじめに

形状記憶合金は、文字どおり自身の形状を記憶でき、低温相(マルテンサイト相またはM相)で5-6%の歪みの範囲内でどのように変形しても、加熱すると高温相(母相またはP相)に逆変態すると共に記憶した形状に戻る形状記憶効果を示す⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾。形状回復する際に数百MPaもの大きな復元力を発揮するため、仕事をするための力を発生するアクチュエータ機能も有する。また、逆変態温度は、合金の組成や熱処理条件に依存して変えられるため、個々の合金で形状回復するときの温度を自由に決めることができ、温度センサーの機能をも兼ね備えていることになる。

また、P相が安定な高温で外力を加えても、通常の弾性変形を経てM相を誘起できるため、形状記憶効果と同程度の大きな変形を応力誘起M変態で起こすことができる。室温で変形する場合は、逆変態温度を室温以下にすれば良い。この場合には、外力を除くとM相が不安定になり、P相へ逆変態することにより形状が回復する。この現象は超弾性と呼ばれる機能であり、一般の弾性範囲が0.2%程度の歪みであるので、超弾性はその数十倍の大きな弾性範囲を示すことになる。一般の弾性は、応力と歪みが線形関係を示すため、変形量に比例して応力は増加し硬くなる。しかし、M相は一定の応力で誘起するため、超弾性は変形が進んでも外力の増加は必要なく、超弾性変形中の弾性定数がほぼゼロの柔軟な弾性である。この性質は形状記憶効果に劣らず有用であり、形状記憶効果以上に多用されている⁽⁵⁾⁽⁶⁾。

M変態および形状記憶合金の基礎研究と材料開発では、日本は世界の研究拠点の1つとして、歴史的にも現在も研究成果の発信基地になっている⁽⁷⁾⁻⁽⁹⁾。形状記憶合金は実用化が始まって20年以上が過ぎ、応用分野は、家電、通信、交通、機械、建築、医療、生活等の広範囲な分野に広がっていることが特徴である。この間の応用の9割以上は、バルクのTi-Ni系形状記憶合金が使われてきた。今後は、スパッタ薄膜によるマイクロな分野への展開、高温形状記憶合金に

よる高温領域への展開、医療機器への展開が重要になる。また、駆動源が熱や応力ではなく、磁場を利用できる磁性形状記憶合金の開発で、高速駆動への展開が望まれている。さらに、生体への適用ではNiフリーのTi系形状記憶合金の開発展開が期待されている。また、Fe系およびCu系の形状記憶合金も実用レベルの特性を出しつつある。形状記憶合金の応用は、工業、医療を含む広範囲の分野へ展開可能な産業横断的技術であり、インテリジェントシステムを構築するための素子としても強い関心が持たれている⁽¹⁰⁾。

本稿では、最近の形状記憶・超弾性合金の基礎研究と実用化を目指した材料開発の動向および将来展望について概観する。

2. Ti-Ni系合金

Ti-Ni合金が形状記憶効果を示すということは、1961年に米国の海軍研究所において発見され、1963年に論文発表された⁽¹¹⁾。その特異な性質の故に多くの研究者の関心を集めたが、1980年代の初めまで約20年間にわたり謎に包まれた材料であった。

この理由の一つとして、良質の単結晶作製が困難であったこと他に、内部組織の制御とその効果についてほとんど理解されていなかったことが挙げられる。研究の進んでいた他の形状記憶合金の場合、記憶を付与するためには、相分離のない単相状態の高温で熱処理を行った後、水に焼入れることが常識であった。しかし、1980年代に入って、組織制御の可能な中間温度で熱処理を行ってもTi-Ni合金の形状記憶効果が損なわれず、むしろ安定度が格段に増すことが見出された⁽¹²⁾。

この結果を起点にして、形状記憶特性が、合金組成の他に内部組織に極めて敏感である事が明らかにされ、形状記憶特性を飛躍的に改善するための組織制御の方法が確立された。Ti-Ni系形状記憶合金が実用材として成長した結果、1982年以来約10年間は1000件前後の特許申請がなされ、積算すると合計約20000件以上にもなる。現在でも数百件程度が出願

* 筑波大学教授；大学院数理工学物質科学研究科(〒305-8573 つくば市天王台1-1-1)
Development and Prospect of Shape Memory Alloys; Shuichi Miyazaki (Institute of Materials Science, University of Tsukuba, Tsukuba)
Keywords: *shape memory alloy, superelastic alloy, martensitic transformation, magnetic alloy, biomaterial*
2006年10月10日受理

され続けている。応用範囲は工業のみならず医療をも含めたあらゆる産業分野に広がっており、実用面から要求される材料開発の問題が基礎研究の対象にもなっている。研究範囲がマイクロからマクロにおよび、基礎研究に加えて実用研究までがそれぞれニーズとシーズとなり直結して、研究の幅広さと多様性を生み出している。

Ti-Ni 合金が実用材料として認知された結果、金属材料の分野から離れて機械工学でも形状記憶合金が重要な研究対象として扱われている。またアメリカでは、センサーやアクチュエータの機能を有するスマートマテリアルを用いたスマートシステムの研究開発が盛んである。ここで使用されるアクチュエータ材料の代表の1つはTi-Ni系形状記憶合金であることを考えると、Ti-Ni合金はスマートシステムの研究分野を生み出した立役者の代表格でもある。

Ti-Ni系合金は調べれば必ず新しい発見がある材料であり、基礎研究も継続して進められてきた。最近の話題に、多段階変態の現象とその起源に関する研究がある。M相の多段階変態に関しては古くから報告があったが、試料の不純物や熱処理条件の効果が不明なため強く関心は持たれなかった。しかし、最近になって多くの報告が行われるようになり⁽¹³⁾⁻⁽¹⁹⁾、多段階M変態現象とその原因について関心が高まっている。この研究の流れでR相変態の多段階変態も発見され⁽²⁰⁾⁽²¹⁾、それについても関心が出始めている⁽²²⁾。

多段階変態は、変態温度が試料の場所に依り異なることが原因であるから、例えば、析出物周りの応力場や合金濃度の変化のある内部組織状態になれば現れる。しかし、熱処理中に酸素が混入しなければそのような内部組織にはならないという意見も出されている⁽¹⁸⁾。多段階変態の現象が、試料作製条件に起因するものか、またはそのような外的影響が入らなくても多段階変態を起こす内部組織が熱処理で形成されるものかの合意は今後の展開を待つことになる。

また、M変態に先立って現れるR相変態の基本特性を解明するための努力も継続している⁽²³⁾⁽²⁴⁾。R相変態がM変態の前駆現象か独立した変態かという問題は、依然として研究対象になっている。R相変態とは独立に、電荷密度波(CDW)相転移に伴うドメイン構造が現れるという意見も出てきている。

Ti-Ni合金は実用材料として使われているため、製造・加工技術の改良も重ねられている。例えば、インプラント等の生体材料として使うためにポラス材料の要望がある⁽²⁵⁾。また、Ti-NiはB2規則構造をしており金属間化合物の仲間であるため、加工は基本的には困難である。そのため、加工の容易なTiとNiの線材あるいは板材を素材として用い、所定のサイズまではこれら金属複合材を引抜き加工あるいは圧延加工により線材あるいは板材にする。その後、熱処理により合金化してTi-Ni合金の線材あるいは板材を作製する⁽²⁶⁾。最終的に合金を1度だけ冷間加工すれば、熱処理との組み合わせで良好な特性を引き出せることになる。また、急冷凝固法もTi-Ni系合金作製には以前から用いられている方法である⁽²⁷⁾⁽²⁸⁾。圧延加工法では、等原子比組成のTi-Ni二元合金では板厚を30 μm 程度までにはできるが、Ni過剰のTi-Ni二元系やTi-Ni-X三元系では加工性が悪くなるため、圧延加工は困難である。急冷凝固法を使えば、瞬時に厚さが数十ミクロンのリボンになるため、これら難加工材の加工に適用できる。また、歯科治療などで用いられる複雑な形状に仕上げる場合には、鋳造や粉末焼結が試みられている⁽²⁹⁾⁽³⁰⁾。これらの製造技術により作製された材料が大量に供給されたということは聞いていないが、製造方法

のオプションとして今後も開発が続くと思われる。

Ti-Ni合金の使用環境の限界として高温領域がある。変態温度を上げることは、Au, Pd, Pt等の貴金属添加やZr, Hfの添加で可能であるが、いずれの場合も加工性が悪く、実用的に供給されていない。さらに、貴金属添加は高価であるため応用範囲に制限がある。しかし、100 $^{\circ}\text{C}$ 以上で使用できれば、家電製品の応用範囲がさらに広がり、エンジン関係、発電関係、原子力関係にも応用範囲を拡大できるため、高温形状記憶合金の研究は継続して行われている⁽³¹⁾⁻⁽³⁴⁾。

以上は、溶解法で作製するバルク材料に関するものであるが、スパッタリング法によりTi-Ni合金薄膜を作製し、完全な形状記憶効果を1ミクロン厚さの薄膜で実現できている⁽³⁵⁾。変形挙動に及ぼす結晶粒径や試料厚さの効果についても調べられている⁽³⁶⁾⁽³⁷⁾。マイクロマシンを駆動させるための強力大変位マイクロアクチュエータの作製を可能にする材料として強く期待され、ダイアフラム型アクチュエータの試作も行われている⁽³⁸⁾⁻⁽⁴⁰⁾。今後、マイクロマシン等のマイクロな分野における応用が期待される。

3. 磁性合金

従来の形状記憶合金は、温度変化によりマルテンサイト変態と逆変態が起こり、形状変化を示す。このため、試料の熱伝導による温度変化が応答性を決めるため、バルク材料では早い動きが得られない。しかし、温度ではなく磁場により形状変化する磁性形状記憶合金が見出され、最近Ti-Ni系合金に次ぐ数の研究者が研究に取り組んでいる。2005年6月13日-17日に上海で開催されたマルテンサイト変態に関する国際会議(ICOMAT-05)で形状記憶合金に関する発表としては、Ti-Ni系合金は104件、磁性合金は59件、その他の形状記憶合金は約50件であった。その他の形状記憶合金には、Fe系、Cu系、Ti系等が含まれる。ICOMATは3年に1回開催され、マルテンサイト変態と形状記憶合金に関する国際的に最も権威のある会議であり、世界の研究動向が読み取れる⁽⁴¹⁾。

磁場による格子の弾性歪みで形状変化を示す材料は従来からあり、その代表はTERFENOL-Dと呼ばれる磁歪材料である。この変形機構とは異なる、磁場による形状変化が1996年にNi-Mn-Ga合金で見出された⁽⁴²⁾。磁歪材料の歪みは0.1%程度の大きさであるが、形状変化の機構が異なるNi-Mn-Gaの歪みは数%にもなる。Ni-Mn-Gaのマルテンサイト相が強磁性であるため、マルテンサイトのバリエーションは結晶方位の異なるドメイン構造に加えて磁区構造を有している。このため外部応力を加えなくても磁場を印可すると結晶方位が変わり形状変化を示すことになる。もちろん、外部応力を加えても、通常形状記憶合金のM相と同様、バリエーションの配列を変えることができる。磁性材料の場合、磁場の方向を変えることで、M相バリエーションを再配列できるため2方向に繰返し変形が可能である⁽⁴³⁾。

しかし、通常形状記憶合金のM相の場合は、外部応力の方向を変えてM相バリエーションの再配列による形状変化をさせても意味がないので、加熱によりM相をP相に逆変態させることで形状変化を行う機構を使う。つまり、初めにM相に外部応力をかけて変形させ、その後加熱して逆変態を行うことで形状回復させる。この時の逆変態に伴う形状回復応力は、前述のようにTi-Ni合金では数百MPaになり、強力なアクチュエータ機能を発揮する。しかし、磁場の方向を変えて形状回復させる機構の磁性材料では、回復応力

が数 MPa と小さいことが実用範囲を狭めることになる。また、Ni-Mn-Ga は脆い材料であるため加工性が悪い。実用化のためには、加工性の改善が必要である。しかし、Ni-Mn-Ga が脆いことを逆手に取って、粉々に砕いた粉末を樹脂に埋め込んだ複合材料で磁場による形状変化も確認されている⁽⁴⁴⁾。一言追記すると、Ni-Mn-Ga も加熱による形状回復をするが、この機構を使うのであれば、遥かに特性の優れた Ti-Ni があるため出番がない。Ni-Mn-Ga 以外に、Fe-Pd, Fe₃Pt 等の磁性形状記憶合金の開発も行われているので期待したい⁽⁴⁵⁾⁽⁴⁶⁾。また、磁性形状記憶合金の磁場印加による変態温度の変化⁽⁴⁷⁾、電子線ホログラフィーによる磁区の観察⁽⁴⁸⁾、X 線回折による構造解析⁽⁴⁹⁾などの基礎研究も進んでいる。

加工性が悪いので、加工せずにそのまま使える形態として、磁性薄膜をスパッタ法で作製し、マイクロアクチュエータへの応用を目指した研究も進められている⁽⁵⁰⁾⁽⁵¹⁾。バルクの Ni-Mn-Ga と同様の形状変化が磁場印可で確認されている。高速駆動マイクロアクチュエータ素子として期待されているが、Ti-Ni スパッタ薄膜でも 100 Hz の高速応答性が確認されてきたので、それより遥かに高い応答性が実現できることが望まれる。

磁性形状記憶合金に関しては、本特集号でも取り上げられているため、詳細はそちらをご覧ください。

4. Ni フリー Ti 基合金

Ti-Ni 系合金は前述のように医療材料としても魅力的な材料で、既に歯列矯正ワイヤ、ガイドワイヤ、眼鏡フレーム、ステント、歯科インプラント等として実用化されている。しかし、合金中の半分の元素が Ni であり、Ni のアレルギー性および毒性についての懸念が医療サイドに潜在的にある。しかし実際は、Ti-Ni の医療分野での使用に際して、問題のあるケースはほとんど報告されていない。この理由として、(1) Ti-Ni は規則格子構造であり、Ni と Ti の異種原子同士の結合力が大きいので Ni が溶出しにくい、(2) Ti-Ni の表面は安定な Ti 酸化物で覆われていて表面状態が安定である、(3) 例え表面の Ni が溶出しても、その後の表面は Ti で覆われた状態になること等が考えられる。しかし、医者と患者および厚生省の Ni に対する心理的な不安感を取り除けない。そこで、形状記憶・超弾性合金の医療分野への進出を加速させるためには、Ni フリーの Ti 基合金の開発が不可欠である⁽⁵²⁾。

Ti 基合金において初めて形状記憶効果が確認されたのは、Ti-Nb 合金において 1971 年であるが、偶然見つかったと思われる⁽⁵³⁾。次が 1982 年に Ti-V-Fe-Al 合金で見出された⁽⁵⁴⁾。この合金は、当時構造材料として開発されたものであり、形状記憶効果が現れるとは思われていなかった。その後、Ti 基構造材料の中から、Ti 基形状記憶合金の探索が数研究グループで行われたが、特性が不十分で大きな研究の流れはできなかった。2000 年に入ってから、既存の構造材料ではなく、Ti 基超弾性合金の探索が日本の研究者を中心に始まった⁽⁵⁵⁾⁻⁽⁵⁹⁾。Ti 基合金の温度ヒステリシスは Ti-Ni よりも少し大きいので、形状記憶効果よりも超弾性特性に開発の目標が設定されている。また、医療分野では超弾性が有用な用途が多い。Ti-Nb および Ti-Mo を基にした合金系が有望として研究され、これらに人体に有害でない置換型元素として Mo, Zr, Ta, Sn, Sc 等を添加して合金開発が進められている⁽⁵²⁾。また、侵入型元素として O, N 等の効果も調べられている。侵入型元素は基本的には、すべり変形による降伏

応力を上げると共に、変態温度を下げる効果がある⁽⁵⁹⁾⁽⁶⁰⁾。一般的に、Ti 合金の特徴の一つとして、圧延加工が極めて容易であり、中間焼鈍せずに 99% 以上の冷間加工が可能である。この理由の一つは、P 相が不規則構造の β 相 (BCC) であり、M 相も不規則構造の α'' 相 (斜方晶) であることである。さらに変態温度付近では弾性定数が極めて小さくなり、理想強度が低いことも考えられる⁽⁶¹⁾。その結果、強い $\{001\} \langle 110 \rangle$ 加工集合組織が発達し、再結晶温度以上で熱処理しても強い $\{112\} \langle 110 \rangle$ 再結晶集合組織が形成される⁽⁶²⁾⁽⁶³⁾。いずれの集合組織も、変態歪みが最も大きい $\langle 110 \rangle$ が圧延方向に平行である。現在までに、回復歪みは 5% 以上が実現できている。Ti 基形状記憶合金の研究開発は、現在日本が突出しているが、今後、世界中で研究者が増えると思われる。

5. その他材料

Fe 系合金と Cu 系合金も古くから形状記憶効果が認められており⁽⁶⁴⁾⁻⁽⁶⁶⁾、Ti-Ni 系合金と比べて素材費と加工費が安いので、実用化を念頭に置いて開発が行われてきた。しかし、Fe 系合金では、回復歪みが 3% 以下と小さく、実用化が進んでいなかった。変態温度ヒステリシスが大きいので、繰り返し利用するアクチュエータとしては不向きで、一回だけの形状記憶効果のみが利用できる特性である。最近、Fe-15Mn-5Si-9Cr-5Ni (mass%) に 0.5% Nb と 0.06% C を添加した系で、4% 歪みの変形に対して 90% の形状回復が実現できている⁽⁶⁷⁾。水道管のカップリングに使えば、大きな市場が形成できると期待されるが、実現していない。大量生産はされていないが、大口径の管継手など一部で利用され始めている。

Cu 系合金は、かつては Cu-Al-Ni や Cu-Zn-Al が研究されていた。大きな問題は、加工性と安定性である。Cu-Al-Ni は粒界破壊をするため脆いことが問題であった。これは、規則合金であると共に、弾性異方性が高いことにも起因する。このため、結晶粒の微細化や B 添加による延性改善の試みも為されたが、実用化には至っていない。また Cu 系合金の問題に、使用中の時効効果により変態温度が変動する不安定さもあり、実用化が遅れていた。最近になって、Cu-Al-Mn で形状記憶効果と超弾性が確認されている⁽⁶⁸⁾。この合金の規則度は低いので塑性加工が容易で熱的にも安定なため、線材やチューブの作製により実用化を目指した研究開発が行われている⁽⁶⁹⁾⁽⁷⁰⁾。

6. おわりに

形状記憶合金は、環境温度の変化を感知して機能する材料であり、その温度範囲を高温側へ拡大することで、応用範囲の拡大を試みている。また、磁場環境に反応して機能する磁性形状記憶合金の開発も進んでいる。Ti-Ni 系合金は、耐食性、耐摩耗性にも優れており、耐環境性にも安定している。また、生体環境中では、材料自身の安定性に加えて、生体環境へも安心で安全な材料として Ni フリーの Ti 基合金の開発で医療応用の拡大が期待されている。さらに、構造物の耐震性向上にも利用可能な、防振機能も兼ね備えており、地震や台風などの自然災害に対して、安心・安全な材料として利用することも期待されている。スパッタ薄膜などのマイクロサイズの材料開発で、マイクロな領域への応用の実現が可能になりつつある。さらに、廉価な Cu 系合金と Fe 系合金の開発で、水道管の連結のような身近な生活環境への応用拡大も

期待されている。形状記憶・超弾性特性の改善で、応用範囲の拡大がさらに期待でき、そのためには、ナノサイズ組織の解明と制御が不可欠である。形状記憶・超弾性合金の基礎研究に裏打ちされた材料開発が、今後の応用市場をさらに拡大し、社会に一層貢献できることを願っている。

文 献

- (1) 舟久保熙康編：形状記憶合金，産業図書，(1984)。
- (2) Ed. By K. Otsuka and C. M. Wayman: Shape Memory Materials, Cambridge Univ. Press, (1998)。
- (3) 田中喜久昭，戸伏寿昭，宮崎修一共著：形状記憶合金の機械的性質，養賢堂，(1993)。
- (4) G. Airoldi, I. Muller and S. Miyazaki 編著：Shape Memory Alloys—From Microstructure to Macroscopic Properties, Trans. Tech. Publications, (1997)。
- (5) 形状記憶合金用途開発委員会編：形状記憶合金とその使い方，日刊工業新聞社，(1987)。
- (6) 宮崎修一，佐久間俊雄，渋谷壽一編：形状記憶合金の特性と応用展開，シーエムシー，(2001)。
- (7) 西山善次：マルテンサイト変態基本編，丸善，(1971)。
- (8) 清水謙一：日本金属学会会報，**26**(1987)，605-609。
- (9) 大塚和弘：まてりあ，**36**(1997)，858-861。
- (10) 古屋泰文，宮崎修一，馬越佑吉，飯島高志，今泉伸夫編：マルチフェロイクス材料・デバイス，金属，**76**(2006)。
- (11) W. J. Buehler, J. V. Gilfrich and R. C. Wiley: J. Appl. Phys., **34**(1963)，1475-1477。
- (12) 宮崎修一：まてりあ，**35**(1996)，179-184。
- (13) L. Bataillardt, J.-E. Bidaux and R. Gotthardt: Phil. Mag. A, **78**(1998)，327-344。
- (14) D. Favier, Y. Liu and P. G. McCormick: Scripta Metall. Mater., **28**(1993)，669-672。
- (15) J. Khalil-Allafi, X. Ren and G. Eggeler: Acta Mater., **50**(2002)，793-803。
- (16) A. Dlouhy, J. Khalil-Allafi and G. Eggeler: Phil. Mag., A, **83**(2003)，339-363。
- (17) G. Fan, W. Chen, S. Yang, J. Zhu, X. Ren and K. Otsuka: Acta Materialia, **52**(2005)，4351-4362。
- (18) M. Nishida, T. Hara, T. Ohba, K. Yamaguchi, K. Tanaka and K. Yamauchi: Mater. Trans., **44**(2003)，2631-2636。
- (19) J. I. Kim and S. Miyazaki: Acta Materialia, **53**(2005)，4545-4554。
- (20) J. I. Kim and S. Miyazaki: Metallurgical and Materials Transactions A, **36A**(2005)，3301-3310。
- (21) J. I. Kim, Yinong Liu and S. Miyazaki: Acta Materialia, **52**(2004)，487-499。
- (22) Y. Zhou, J. Zhang, G. Fan, X. Ding, J. Sun, X. Ren and K. Otsuka: Acta Materialia, **53**(2005)，5365-5377。
- (23) Y. Murakami and D. Shindo: Phil. Mag. Lett., **81**(2001)，631-638。
- (24) M. Choi, J. Ogawa, T. Fukuda and T. Kakeshita: Mater. Sci. and Eng. A, **438-440**(2006)，527-530。
- (25) B. Y. Li, L. J. Rong, Y. Y. Li and V. E. Gjunter: Acta Mater., **48**(2000)，3895-3904。
- (26) D. Tomus, K. Tsuchiya, M. Inuzuka, M. Sasaki, D. Imai, T. Ohmori and M. Umemoto: Scripta Mater., **48**(2003)，489-494。
- (27) Y. Furuya, M. Matsumoto, H. S. Kimura and T. Masumoto: Mater. Sci. and Eng. A, **147**(1991)，L7-L11。
- (28) A. Khantachawana, H. Mizubayashi and S. Miyazaki: Mater. Trans., **45**(2004)，214-218。
- (29) J. Kasuga, T. Yoneyama, E. Kobayashi, T. Hanawa and H. Doi: Mater. Trans., **46**(2005)，1555-1563。
- (30) H. Kato, T. Koyari, M. Tokizane and S. Miura: Acta Metall. et Mater., **42**(1994)，1351-1358。
- (31) 金 熙榮，奥津和俊，宮崎修一：まてりあ，**42**(2003)，655-661。
- (32) V. C. Solomon and M. Nishida: Mater. Trans., **43**(2002)，897-901。
- (33) T. Yamamuro, Y. Morizono, J. Honjyo and M. Nishida: Mater. Sci. and Eng. A, **438-440**(2006)，327-331。
- (34) Y. Yamabe-Mitarai, T. Hara and H. Hosoda: Mater. Trans., **47**(2006)，650-657。

- (35) S. Miyazaki and A. Ishida: Mater. Sci. and Eng. A, **273-275**(1999)，106-133。
- (36) A. Ishida, M. Sato, T. Kimura and S. Miyazaki: Phil. Mag. A, **80**(2000)，967-980。
- (37) A. Ishida and M. Sato: Acta Mater., **51**(2003)，5571-5578。
- (38) 宮崎修一：応用物理，**69**(2000)，38-42。
- (39) 宮崎修一：未来材料，**3**(2003)，2-5。
- (40) 石田 章：まてりあ，**40**(2001)，44-51。
- (41) 清水謙一：まてりあ，**42**(2003)，141-144。
- (42) K. Ullakko, J. K. Huang, C. Kantonner, R. C. O'Handley and V. V. Kokorin: Appl. Phys. Lett., **69**(1996)，1966-1968。
- (43) 福田 隆，掛下知行，竹内徹也：まてりあ，**44**(2005)，285-291。
- (44) H. Hosoda, S. Takeuchi, T. Inamura, K. Wakashima and S. Miyazaki: Mater. Sci. Forum, **475-479**(2005)，2067-2070。
- (45) T. Sakamoto, T. Fukuda, T. Kakeshita, T. Takeuchi and K. Kishio: J. Appl. Phys., **93**(2003)，8647-8649。
- (46) T. Kakeshita, T. Takauchi, T. Fukuda, M. Tsujiguchi, T. Saburi, R. Oshima and S. Muto: Appl. Phys. Lett., **77**(2000)，1502-1504。
- (47) J. H. Kim, F. Inaba, T. Fukuda and T. Kakeshita: Acta Materialia, **54**(2006)，493-499。
- (48) Y. Murakami, D. Shindo, T. Sakamoto, T. Fukuda and T. Kakeshita: Acta Materialia, **54**(2006)，1233-1239。
- (49) M. Mitsuka, T. Ohba, T. Fukuda, T. Kakeshita and M. Tanaka: Mater. Sci. and Eng. A, **438-440**(2006)，332-335。
- (50) 大塚 誠：まてりあ，**44**(2005)，308-314。
- (51) M. Ohtsuka, Y. Konno, M. Matsumoto, T. Takagi and K. Itagaki: Mater. Trans., **47**(2006)，625-630。
- (52) 金 熙榮，細田秀樹，宮崎修一：軽金属，**55**(2005)，613-617。
- (53) C. Baker: Metal Sci. J., **5**(1971)，92-100。
- (54) T. W. Duerig, J. Albrecht, D. Richter and P. Fischer: Acta Metall., **30**(1982)，2161-2172。
- (55) E. Takahashi, T. Sakurai, S. Watanabe, N. Masahashi and S. Hanada: Mater. Trans., **43**(2002)，2978-2983。
- (56) H. Hosoda, Y. Fukui, T. Inamura, K. Wakashima, S. Miyazaki and K. Inoue: Mater. Sci. Forum, **426-432**(2003)，3121-3125。
- (57) H. Y. Kim, Y. Ohmatsu, J. I. Kim, H. Hosoda and S. Miyazaki: Mater. Trans., **45**(2004)，1090-1095。
- (58) T. Maeshima and M. Nishida: Mater. Trans., **45**(2004)，1096-1100。
- (59) T. Furuwara, S. Annaka, Y. Tomio and T. Maki: Mater. Sci. and Eng. A, **438-440**(2006)，825-829。
- (60) J. I. Kim, H. Y. Kim, H. Hosoda and S. Miyazaki: Mater. Trans., **46**(2005)，852-857。
- (61) H. Y. Kim, Y. Ikehara, J. I. Kim, H. Hosoda and S. Miyazaki: Acta Mater., **54**(2006)，2419-2429。
- (62) T. Inamura, Y. Fukui, H. Hosoda, K. Wakashima and S. Miyazaki: Mater. Trans., **45**(2004)，1083-1089。
- (63) H. Y. Kim, T. Sasaki, K. Okutsu, J. I. Kim, T. Inamura, H. Hosoda and S. Miyazaki: Acta Mater., **54**(2006)，423-433。
- (64) A. Sato, K. Soma and T. Mori: Acta Metall., **30**(1982)，1901。
- (65) H. Warlimont and L. Delaey: Progress in Materials Science, **18**(1974)。
- (66) S. Kajiwara: Mater. Sci. and Eng. A, **273-275**(1999)，67-88。
- (67) Z. Z. Dong, S. Kajiwara, T. Kikuchi and T. Sawaguchi: Acta Mater., **53**(2005)，4009-4018。
- (68) Y. Sutou, T. Omori, K. Yamauchi, N. Ono, R. Kainuma and K. Ishida: Acta Mater., **53**(2005)，4121-4133。
- (69) 須藤祐司，大森俊洋，貝沼亮介，石田清仁，山内 清：まてりあ，**42**(2003)，813-821。
- (70) Y. Sutou, T. Omori, J. J. Wang, R. Kainuma and K. Ishida: Mater. Sci. and Eng. A, **378**(2004)，278-282。



宮崎修一

★★
1979年 大阪大学大学院工学研究科博士課程修了
筑波大学物質工学系講師，助教を経て
1998年 筑波大学物質工学系教授
2003年4月より現職
この間，1985/1986米国イリノイ大学客員研究員
専門分野：マルテンサイト変態，形状記憶合金，生体材料
Ti-Ni系形状記憶合金のバルク材料とスパッタ薄膜を開発すると共に，生体用NiフリーTi基形状記憶合金を研究展開中。
★★