

# 「延性金属粒子分散による高強度マグネシウム合金の機械的特性、特に延性改善に関する研究」

北海道大学 大学院 工学研究科 物質工学専攻 材料物性工学講座

助教授 三浦誠司

(平成 12 年度奨励研究助成 AF-2000022)

キーワード：マグネシウム合金、複合材料、軽量化

## 1. 研究の目的と背景

省エネルギーへの要求や種々の携帯型機器の普及により、軽量化な構体材料・構造用材料が求められている<sup>1)</sup>。マグネシウム(以下、Mg)は比重が1.74でアルミニウム(比重2.70)と比して遥かに軽量であるが、結晶構造に起因する低い延性や劣った強度が実用上の大きな難点である。強度向上を指向したMg基複合材料は、加工が困難なSiCやカーボンなどの複合強化材との組み合わせが研究対象となっており、塑性変形能改善はほとんど期待できない。上述の分散材を含む複合材料は廃材となった際のリサイクルに難点を抱えており、また母相(マトリクス)との界面適合性などに根本的な問題がある。また、自動車など交通機関に用いる場合は衝突事故時に運動エネルギーを変形によって吸収することが運転者や同乗者の安全確保に重要であるが、Mg合金は延性が乏しく一般にそのような機能において劣る<sup>2)</sup>。

本研究では、活動可能なすべり系が不十分なために粒界に応力が集中して破壊に至るMg合金に対し<sup>3,4)</sup>、十分な塑性変形能を持つ高強度純金属粒子を粒界に導入し、分散粒子の塑性変形

による応力集中緩和の延性化への寄与を明らかにすることを目的とする。分散純金属としてはチタン(Ti)を対象とし、そのMg合金への分散状況および形態の決定要因を明らかにする。

MgとTiの二元系状態図を図1に示す<sup>5)</sup>。お互いほとんど固溶せず、中間相も形成しないことから、純Ti粒子を安定的にMgマトリクス内に分散させることができると考えられる。ここで考慮すべき点は、純Tiの変形強度が純Mgより遙かに高い点である。よって本研究ではいくつかの高強度なマトリクス合金も選択し、強度と延性発現の関係、および組織との関係について系統的な調査を行った。

## 2. 実験方法

高周波雰囲気溶解装置により、アルゴン雰囲気下で高純度黒鉛のつぼ中で溶解したMgおよびその合金に純Ti粒子(粒子径45ミクロン)を投入し、その後軟鋼製鑄型に鑄込んで分散複合材を作成する。分散材の体積比は純Mgに対しては10体積%、その他の合金に対しては2体積%とした。

その後、石英管に真空封入して表1に示す所定の熱処理を行った。ピッカース硬さ試験により、Mg-6Zn合金マトリクスの強度はTi粒子の有無に寄らず変化していないことが示されたことから、Tiの存在は析出相構成・体積比に影響を及ぼさないと考えられる。また、組織観察は光学顕微鏡と走査型電子顕微鏡を用いて行った。

機械的性質の評価は、一様な曲げモーメントの領域を広く与えられることから四点曲げ試験によって行った。試験は常温で行い、試験片寸法は2x6x30mm、評点間距離は7mmである。インストロン型試験装置により、クロスヘッドスピード1mm/minで負荷を与えた。試料中央付近の一様な曲げ変形を示した領域の曲率半径から曲げ延性を評価した。

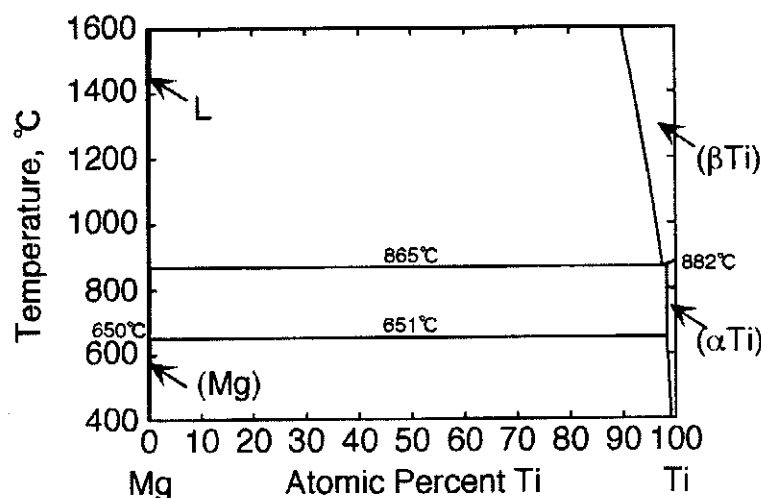


図1 Mg-Ti二元系状態図<sup>5)</sup>。

表1 マトリックス毎の試料の熱処理条件

マトリックス	熱処理条件
純 Mg	鋳込みまま
Mg-6wt%Zn	500°C × 1hr → 185°C × 20hr (T6)
Mg-3at%Dy	450°C × 24hr → water quenching (T4)

### 3. 実験結果および考察

図2は Mg-6wt%Zn+Ti<sub>p</sub> インゴットの鋳込みまま組織を示したものである。化合物相の析出が粒界から開始していることが見て取れる。Ti 粒子は粒界にあり、凝固時に晶出した固相から液相側に吐き出される形で最終凝固部に現れているものと考えられる。これは他の合金系とも共通する知見である。このことから、固液二相領域の狭い合金の方が粒子の集中が少なくなることが期待される。

一般に複合材料作製で最も問題となるのが分散材とマ

Mg-6wt%Zn+Ti, as cast

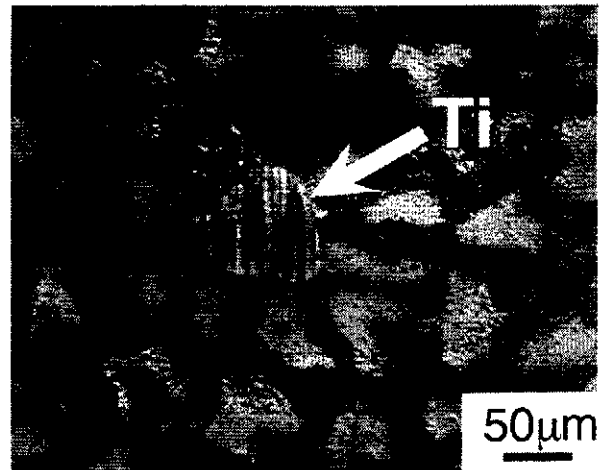


図2 Ti 粒子分散 Mg-6wt%Zn 材の熱処理後組織。

トリックスの濡れ性である。図2からも判るように、Ti 粒子とマトリックスは十分密着しており、ポイドなどは認められない。また、他の部分ではかなり細かい隙間までマトリックスが流入していることが認められ、相互の濡れ性は非常に良好であると言える。一般に Ti は非常に酸化し易いため、Ti 粒子表面には酸化物が形成されていると考

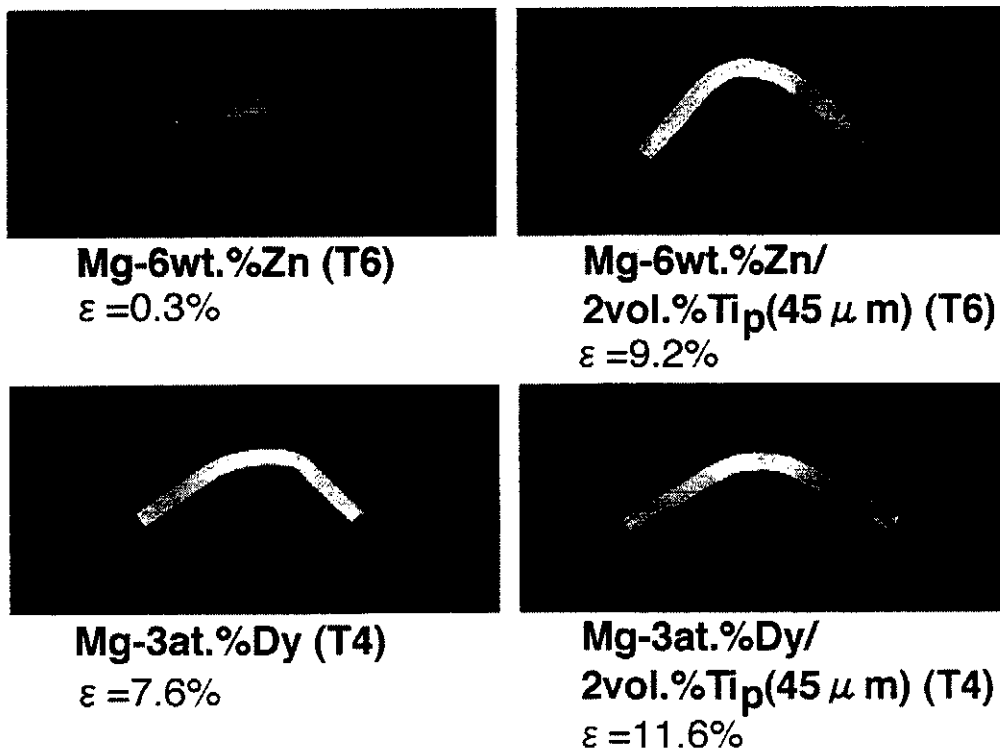


図3 曲げ試験結果

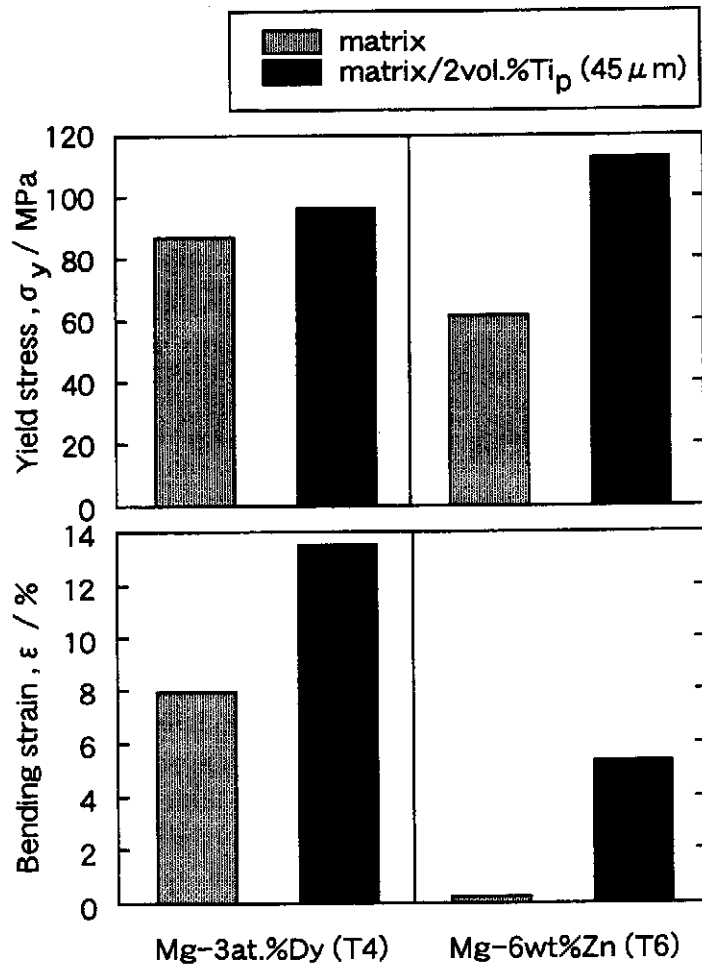
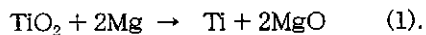


図4 供試合金の強度と曲げ延性の比較

えられる。しかしながら Mg 合金溶湯中に投入されることにより、以下に示すような反応に基づいて Ti よりも酸化物形成傾向の高い Mg によって表面酸化物が還元されると考えられる。



これにより、酸化物のない清浄な表面を持った Ti 粒子となり、マトリクスとの濡れ性が改善されたものと考えられる。

図3に曲げ試験結果の一部を示す。Ti 粒子の有無による延性の違いは一目瞭然である。Ti 粒子分散材では大きな曲げ延性を示し、表面にオレンジピールのような変形に伴う凹凸が認められた。これはミクロに見たときには変形が不均一に起きていることを意味していると考えられることから、マトリクスと Ti 粒子の変

形能の差がその根本的な成因であると考えられる。

図4は Ti 粒子を分散した複合材料と、そのマトリクス合金そのものの延性及び強度を比較したものである。純 Mg に Ti 粒子を分散させた場合を除き、複合化によって強度、延性共に大きな向上が認められる。強度の上昇は Ti 粒子の変形強度が高いためであると考えられる。

図5は変形能の増加をマトリクス強度の関数として示したものである。これより、マトリクス強度が高いほど、変形能の向上が高いことが判る。これは、マトリクスの強度が高いほど、粒界にある Ti 粒子の変形量が大きくなり、粒界への応力集中が緩和されるためと解釈される。純 Mg では変形応力が低いため、Ti 粒子がほとんど変形せず、逆に硬い粒子が存在して延性を劣化させる原因になっていると解釈できる。

このような結果は、一般的に知られている強度と延性の trade-off による合金設計ではなく、両者を共に向上させるという、新たなタイプの合金・複合材料設計が可能であることを意味しており、マトリクス合金の強度向上をさらに押し進めることによってより高い延性を示す高強度 Mg 合金の開発が可能であると結論できる。

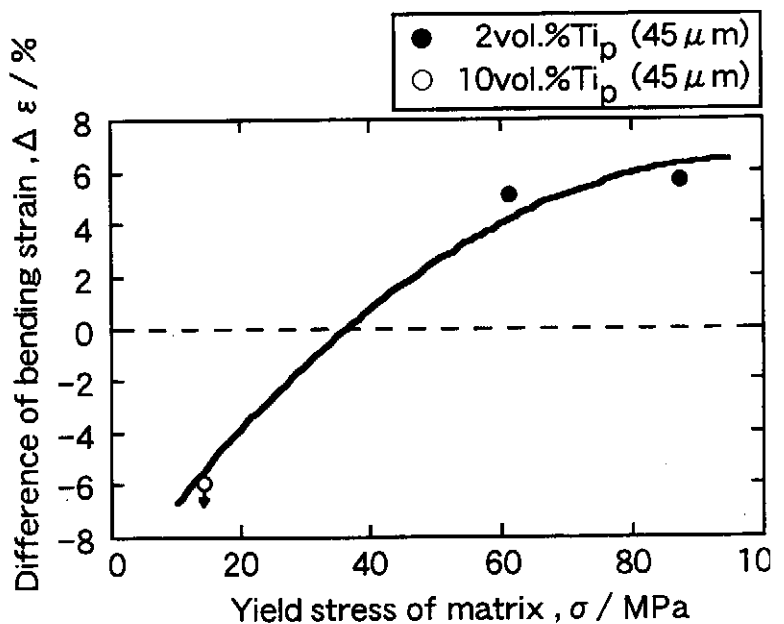


図5 延性能改善効果とマトリクス強度の関係。

#### 4. 結言

これまでほとんど研究がなされていない純金属による分散複合化を、Mg合金の延性改善のために取り上げた。ここでは Mg-Ti 系状態図から判断して、お互いにわずかしが溶け合わないこの組合せを基本とした複合材料の延性に関して研究を行った。その結果、2体積%というわずかな Ti 粒子分散が延性付与に有効であることが示された。また、Mg の酸化傾向が Ti より高いことが、複合材料作製時の界面密着性確保に有効であることが見出された。延性化とマトリクスである Mg 合金の強度の比較から、Ti 粒子の変形に際してマトリクスの変形強度が十分高いことが延性化機構の発現に対して重要な鍵であることが示された。すなわち、高強度の Ti 粒子の変形がマトリクスに対して著しい遅滞を示さないことが延性付与に重要であると考えられる。これはすなわち、マトリクスと分散材の強度比のコントロールという、比較的制御が容易な物性によって延性化が計れることを意味することから、一般的には両立が困難で trade-off の関係にある強度と延性の両方を同時に向上させることができる、新たな Mg 基複合材料の材料設計が有効であることが示された。

#### 謝辞

本研究の遂行にあたり、北海道大学工学部技官大久保賢

二氏および院生岡田峰光君、学生中村元紀君の協力を得たことを付記し、謝意を表する。

#### 参考文献

- 1) F. H. Fores, D. Eliezer and E. Aghion, JOM, 50 [9] (1998), 30.
- 2) A. Ben-Artzy, A. Shtechman, E. Ben-Ari and D. Dayan, "Magnesium 2000", Proceedings of the Second Israeli International Conference on Magnesium Science and Technology, ed. by E. Aghion and D. Eliezer, Magnesium Research Institute LTD., Beer-Sheva, Israel, (2000), 151-158.
- 3) Sunghak Lee, Seung Hyuk Lee and Do Hyang Kim, Met. Mat. Trans. A, 29A (1998), 1221-1235.
- 4) K. Ishikawa, Y. Kobayashi, T. Kaneko and T. Shibusawa, J. Japan Inst. Metals, 61, (1997), 1031-1036.
- 5) H. Okamoto, "Phase Diagrams for Binary Alloys", ASM International (2000), Materials Park, OH, U. S. A.