ナノ組織高強度・超塑性アルミニウム合金 “GIGAS”の開発

大寺克昌^{*1)} 寺林武司^{*1)} 竹谷桂之^{*2)}
井上明久^{**} 増本 健^{***}

1. はじめに

アルミニウム合金は軽くて、しかも優れた耐食性および加工性を有しているため、建築部材や航空機のような輸送機器など多方面にわたって使用され、さらに省資源・省エネルギーの点からアルミニウム合金の使用量が増えるものと期待されてきた。しかしながら鉄合金などに比べ比強度や比弾性率などの点で劣る場合もあり、期待されたほど使用量が伸びていないのが実状である。このような状況を打開することを目指して、アルミニウム合金の強度や弾性率などの特性を向上させる研究開発も活発に行われてきた。例えば、セラミック粒子などをアルミニウムに分散させて弾性率を向上させる方法や急速凝固を利用して既存のアルミニウム合金の組織を微細化し強度を向上させる方法が行われてきた。しかし、これまでの開発ではすでに研究開発が十分に行われていた結晶質構造のアルミニウム合金を基本組成として改良が行われたため、期待したような特性の向上は果たされていなかった。

2. アモルファスアルミニウム合金に着目した開発の経緯

本開発のアルミニウム合金は、本開発者らが世界に先駆けて見出すことに成功した高強度と高延性なアモルファスアル

ミニウム合金に研究開発の端を発している。急速凝固法で作製した Al-Ni-希土類金属系アモルファス合金が 1000 MPa を越えるきわめて高い引張強さを示すこと⁽¹⁾を見出したのに続いて、Al-Ni-Y 系や Al-Ni-Mm (Mm: ミッシュメタル) 系合金でアモルファス合金粉末を押出しする方法で作製した固化材がナノ組織を有し、900 MPa を越える高い引張強さと 90 GPa を越える高い弾性率を合わせ持つ従来にない高強度アルミニウム合金を開発した⁽²⁾。このナノ組織アルミニウム合金は、アルミニウム結晶の微細粒強化と均一微細に分散した金属間化合物による析出強化の相乗効果によって高強度を示すことを明らかにしている⁽³⁾。

さらに Al-Ni-Mm-Zr 系合金でアモルファスとナノ結晶組織の粉末を押出しすることにより作製した固化材は、過飽和に固溶していた Zr を微細な Al₃Zr として Al 結晶粒内に均質に析出させ、さらなる強度の向上を図ることによって最高 1000 MPa の高い強度を達成することに成功し⁽⁴⁾、これらのナノ組織アルミニウム合金は、高い室温強度の外に、高弾性率、高耐熱性にも優れていることを明らかにした。

上記のナノ組織アルミニウム合金は、微細組織に起因した優れた機械的特性を示す外に、高い歪速度で超塑性現象を発現することも確認している⁽⁵⁾。この場合、超塑性現象を発現する温度が 773 K 以上と通常のアルミニウム合金の超塑性発現温度よりも高いため、超塑性加工温度までゆっくりと昇温すると組織の成長が起り、強度が低下してしまう。したがって試験温度まで 10 s 程度で急速昇温することによって、ナノ組織を維持できるとともに、1.0 s⁻¹ のような高歪速度域で超塑性現象を発現できることもナノ組織高強度アルミニウム合金の新規な特性として公表してきた⁽⁶⁾。

このように、ナノ組織アルミニウム合金は、微細組織に起因して優れた機械的性質および高歪速度超塑性現象を発現するなどの注目すべき特性を有している。しかしながら、Al-Ni-希土類金属系や Al-Ni-Mm-Zr 系合金は高価な希土類金属

* YKK 株式会社: 1) 主任研究員 2) 副主任研究員

** 東北大学金属材料研究所教授

*** 財団法人電気磁気材料研究所所長

Development of New Nanostructure Aluminum Alloys “GIGAS” with High Strength and Superplasticity; Katsumasa Ohtera*, Takeshi Terabayashi*, Katsuyuki Taketani*, Akihisa Inoue**, Tsuyoshi Masumoto*** (*YKK Corporation. **Tohoku University. ***Research Institute for Electric and Magnetic Materials)

1997年1月31日受理

表1 GIGAS の代表的化学成分.

(mass%)						
合金名	Ni	Cu	Ti	Zr	Mn	Mg
GIGAS10	8.0	2.1	5.6	1.5	—	—
GIGAS20	8.0	1.2	1.2	1.2	1.0	0.15

表2 GIGAS の機械的性質.

合金名	室温温度 (MPa)	弾性率 (GPa)	423 K の強度 (MPa)
GIGAS10	640~740	>95	350~420
GIGAS20	640~740	>90	470~560

図1 GIGAS20 の押し出し材の TEM 像.

を含んでいるため、広範囲な分野での実用が制限され、希土類金属元素を含まないより安価な合金系で同様な優れた機械的性質を示すナノ組織アルミニウム合金の開発が切望されていた。このような背景に基づいて、これまで開発してきた一連のナノ組織アルミニウム合金の合金設計指針をさらに発展させることにより、希土類金属元素を含まないナノ組織高強度・高加工性アルミニウム合金 “GIGAS”を開発することに成功した。この新アルミニウム合金 “GIGAS”は、比強度、比弾性率、加工性の点でバランスのとれた優れた機械構造用材料である。その合金成分の一例を表1に示しているが、主要溶質元素は、アモルファス相を形成するのに必要な元素でもある。

3. 開発した新合金の特性

(1) 優れた機械的性質および加工性

表2はGIGAS10および20の機械的性質を示している。GIGAS10は、過飽和に固溶したNiやTiが押し出し過程において Al_3Ni や Al_3Ti のような高弾性率の金属間化合物として析出し、これらの金属間化合物が微細(約100 nm)かつ高体積率(約30 vol%)で約400 nmの微細なAl結晶粒中に分散しており、室温で95 GPaを越える高い弾性率を示す。従来のアルミニウム合金でも高SiのAl-Si系合金は高い弾性率を有しているが、Si粒が非常に大きいため、延性に乏しくかつ強度も低かった。これに対してGIGAS10は、金属間化合物も非常に微細で均質に分散しているため、Al-Si系合金に比べ、高い強度を持ち、高強度、高弾性が要求される部位に適している。図1は、GIGAS20の押し出し材のTEM像であるが、約70 nm径の微細な Al_3Ni と Al_3Ti が約300 nmの微細Al中に約25 vol%含まれたナノ複相組織を持ち、室温で高い強度および弾性率を示し、特に473 Kまでの温度範囲で従来のアルミニウム合金に比べて非常に高い耐熱強度を示す。PM/Al-Fe系合金も耐熱性アルミニウム合金としてよく知られているが、PM/Al-Fe系合金は固化成形温度が高

図2 GIGAS と従来の軽金属の比強度および比弾性率の比較.

く、固化成形中にAl結晶が粒成長をおこし、室温近傍での強度は500 MPa程度と超々ジュラルミン以下に低下してしまう。これに対してGIGAS20は、Al結晶粒の成長が生じる673 K以下で容易に押し出し成形できる特徴を有しているため、微細なAl結晶粒を保持でき、高い室温強度を具備している。したがってGIGAS20は室温から473 Kの温度範囲で高強度と高弾性率が要求される用途に使用できるアルミニウム合金である。

図2は、GIGAS10および20の比強度と比弾性率を従来の代表的な軽金属合金と比較したものである。GIGAS10および20ともに従来のアルミニウム合金に比べ、高い比強度と比弾性率を有している。また、チタン合金に比べても比弾性率が20%以上も優れていることが特筆される。

図3はGIGAS20の室温における疲労強度特性を示してい

図3 GIGAS20の室温における疲労強度線図.

図4 超塑性押出鍛造法の例.

る。疲労限は280 MPaであり、従来のアルミニウム合金に比べ30%程度高い値を示す。さらに200°Cまでの広い温度範囲で従来のアルミニウム合金より約30%も高い疲労限を有する優れた特性をもっている。

先に述べたようにナノ組織アルミニウム合金は高歪速度超塑性現象を発現するので、この現象を利用してGIGAS10の成形加工例を図4に示す。GIGAS10の鍛造成形用プリフォーム材(写真上部)を773 K以上の温度で金型に押し込むことによって高加工度の成形を行うことができる。なお、写真に示したペーパーウェイト作製時の成形加工時間は0.5 s以内と非常に短く、高速超塑性の特徴が発揮されている(この成形法を当社では超塑性押出鍛造法と名付けている)。

(2) 実用例

図5は、GIGAS10および20を使用した実用機械部品例を示している。これらの部品は、高比強度、高剛性および高耐

図5 GIGASの実用例例.

熱強度が要求される高速運動部位に使用されている。生産性の向上には機械部品の運動速度を高めることが有効である。しかし、高速域では慣性力や遠心力の影響を大きく受けるため、軽量かつ高強度、高剛性の素材が要求されることになる。“GIGAS”はこのような高速運動部位への利用に特に適しており、その使用量は大きく増大する傾向にある。また最近、多品種少量生産の要求も増えている。従来から亜鉛ダイキャスト用金型には鉄系素材が使われてきたが、少量生産時あるいは型彫り時間短縮のためにアルミニウム合金の金型への使用が試されてきた。これまで開発されてきたアルミニウム合金では耐熱性などの点で問題をもっていたため、ダイキャスト用金型として使用量がほとんど増えていなかったGIGAS20はこのような分野においても使用できることが確認されており、今後従来のアルミニウム合金では適用されていなかったより広い分野への用途拡大が期待できる。

4. 特許所有権

本件に関する特許出願は、合金組成、加工方法などに関して出願中も含めて国内で33件であり、うち7件はすでに登録されている。また、国外にも23件の出願を行っている。

文 献

- (1) A. Inoue, K. Ohtera, A. P. Tsai and T. Masumoto: Jpn. J. Appl. Phys., **27**(1988), 479.
- (2) K. Ohtera, A. Inoue and T. Masumoto: Mater. Sci. Eng., **A134**(1991), 1212.
- (3) K. Ohtera, A. Inoue, T. Terabayashi, H. Nagahama and T. Masumoto: Mater. Trans., JIM, **33**(1992), 775.
- (4) H. Nagahama, K. Ohtera, K. Higashi, A. Inoue and T. Masumoto: Phil. Mag. Lett., **67**(1993), 225.
- (5) K. Higashi, T. Mukai, S. Tanimura, A. Inoue, K. Kita, K. Ohtera and T. Masumoto: Scripta Met., **26**(1992), 191.
- (6) K. Taketani, K. Kita, K. Ohtera, J. Nagahora, A. Inoue and T. Masumoto: J. Mater., Sci., **29**(1994), 6513.