

# 高機能鍛造部材創成のための鍛接法を用いた異材接合と部材高強度化の検討

機能素材加工課 山岸英樹、佐藤 智

## 1. はじめに

輸送機器の軽量化のため異材接合技術のニーズが高まっている。異材接合で問題となる脆弱な金属間化合物(IMC)の生成を抑制する手法として、固相接合に分類されるFSW法やブレイジング法などが試みられているが、これらの手法では母材の一部に熱影響を及ぼし軟化等の劣化が生じる。特に組織強化された鍛造部品では素材の強度を低下させずに接合することは困難なほか、その多くは曲面形状であり生産性の高い接合加工ができない。従ってこれらの制約からも、鍛造材は構造材(展伸材)に比べマルチマテリアル化が進んでいないと考えられる。

高機能鍛造部材用途を考えると、「短時間で安く、成形とともに接合し、かつ部材も高強度化できるプロセス」が、今後市場競争力を高めるものづくり基盤技術の一つになると考えられる。本研究では上記課題に鑑み、これまで開発を進めてきたAl/Mg鍛接法<sup>1)</sup>について、加工条件が及ぼす接合強度への影響のほか、非熱処理部材であるMg合金の鍛接加工における組織制御性を検討した<sup>5)</sup>。

## 2. 実験方法

Fig. 1にA2024とAZ80の鍛接加工の概略を示す。加工にはACサーボプレス機を用いた。接合強度の検討について、素材の予熱は653 K(380 °C)また歪速度を $4.7 \text{ s}^{-1}$ とし、疲労強度に及ぼす2種類の加工条件(A, B)の影響を検討した(標準加工条件A: 1 mm厚Ti, 各接合面の研磨あり, 加圧保持時間1 s, 高生産性加工条件B: 0.3 mm厚Ti, 接合面研磨なし, 加圧保持時間0.1 s)。一方、Mg合金の組織制御性の検討については、上記加工条件Aをベースに、予熱温度593 K(320 °C) ~ 693 K(420 °C)の範囲で行った。結晶粒径とビッカース硬さの関係及びその動的再結晶挙動をZener-Holloman(Z)パラメータで整理した。

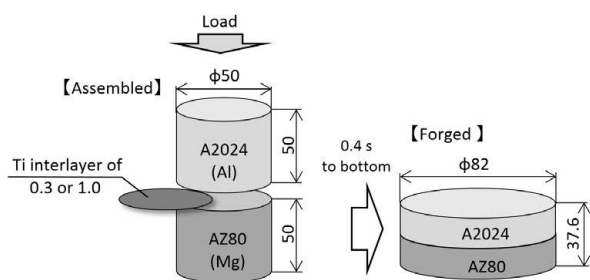


Fig. 1 Configurations of the assembled and after-forged materials (dimensions in mm)

## 3. 実験結果及び考察

加工条件が継手の疲労強度に及ぼす影響を Fig. 2 に示す。条件A及びBの引張強さはともに約146 MPaであったにもかかわらず、疲労強度には特異的な差が生じた。低サイクル破壊は両条件で同程度の強度であるが、高サイクル破壊になると条件Bの継手強度が相対的に大きく低下する挙動を示した。なお破壊位置は両継手において、引張、疲労ともにTi/Mg接合界面であった。種々の材料解析の結果、この特異的な挙動要因はIMCによると結論づけた<sup>5)</sup>。Tiインサート材の薄い条件Bでは、部分的にインサート材が破れることで、接合界面には島状に $\text{Al}_3\text{Mg}_2$ が分布する。このIMC相の面積はごくわずかであり、引張強さにはほぼ影響しないが、IMCをき裂として扱おうと、Fig. 3に示すとおり破壊力学的には低 $\Delta K$ 側の非線形性により、き裂の進展速度により大きな影響を与えるものと考えられる。すなわち、IMCを生じる継手の場合は、引張強さでは疲労強度を判断できないことを示唆している。少なくともAl/Mg鍛接においては、Ti材の破れを避けなければならないことを明らかにした。

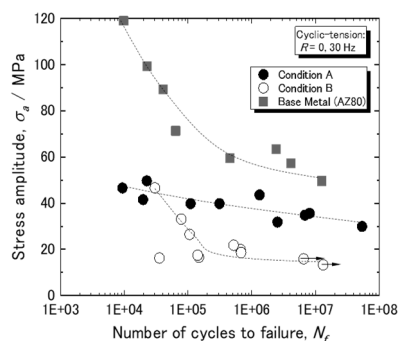


Fig. 2 Stress as a function of number of cycles to failure (S-N curves) of the base metal extruded AZ80 and the Al/Mg bonded materials under standard condition A and rough condition B

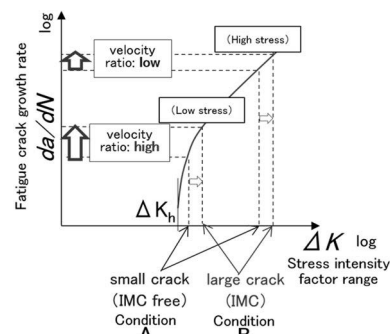


Fig. 3 Schematic diagram of the fatigue crack growth as a function of the stress intensity factor, indicating the influence of intermetallic compounds on the fatigue crack growth rate

次に鍛接法による Mg 合金の組織制御性を検討する。Fig. 4 は本鍛接加工で得られた AZ80 の結晶粒径とビッカース硬さの関係である。ホールペッチ則で良く整理できていることが分かる。鍛接加工条件により結晶粒径を制御することで得られる部材の強度を制御できる。

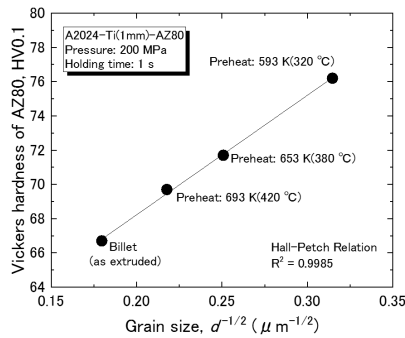


Fig. 4 Relationship between the Vickers hardness of the forged AZ80 and the grain size

本鍛接加工で得られる AZ80 の結晶粒径を Z パラメータにより算出した(Fig. 5)。ここで白抜きマークは塑性発熱を考慮しない場合の値である。また点線枠内の数値は結晶粒径の実測値である(Fig. 4)。計算値は実測値に対してかなり小さい値となった。これは塑性発熱を考慮していないためと考えられた。そこで結晶粒径におおよそ合

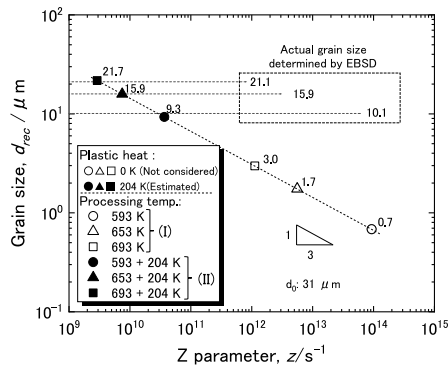


Fig. 5 Relationship between the recrystallized grain size of AZ80 and the Zener-Holloman parameter. The grain sizes of plot (I) were estimated without consideration of the processing heat, while plot (II) assumed a temperature of 204K.

うように塑性発熱を考慮し補正したものが黒塗マークである。塑性発熱を 204 K と見積もったところ実測値はこの理論式上で整理されることが分かった。なお、この 204 K は、予熱温度 693 K の鍛接後外観に一部液相化の兆候が認められたことから、融点を考慮して妥当な温度と考えられた。塑性発熱の温度を実測、あるいは CAE 等により推定できれば、このように鍛接後の Mg 合金の結晶粒径を算出、制御できると考えられる。一方で本法は接合プロセスであるため、継手強度及びその健全性を考慮する必要がある。本材鍛接加工における予熱温度は、引張強さとの関係でこれまでに明らかにしているとおおり、653 K 近傍が最適である<sup>4)</sup>。予熱温度 593 K では引張強さが小さく、また予熱温度 653 K 以上では、引張強さは高強度に安定するものの、693 K まで加熱すると、一部外観に液相となったと認められるバリ等の欠陥が生じる。従って、鍛接加工では、必要とする接合強度から予熱温度の範囲が決まり、さらにはワレ等の欠陥が生じないための歪速度の上限もその温度における塑性変形抵抗から決まる。つまり、これらの制約条件より Z パラメータの範囲が決まり、それにより結晶粒径の制御範囲が決まる。本鍛接プロセスにおいて、マグネシウム合金部材の機械的性質をより向上させたい場合、すなわち結晶粒を微細化させたい場合、加工温度を下げるもしくは歪速度を上げる必要があるが、Z パラメータはプロセス温度と歪速度から決まるので、上記制約より実際は大きくは向上できない。鍛造、圧延など強加工により結晶粒を微細化したビレットを用いることが一つの有効な手段と考えられる。

#### 参考文献

- 1)山岸ほか: 特許第 5830727 号
- 2)山岸ほか: 特願 2017-243612
- 3) H. Yamagishi et al.: *Metall. Mater. Trans. A.*, **46** (2015) pp. 3601-11.
- 4) H. Yamagishi et al.: *Metall. Mater. Trans. A.*, **49** (2018) pp. 4659-68.
- 5) H. Yamagishi et al.: *Metall. Mater. Trans. A.*, **51** (2020) pp. 2154-62.

キーワード : Al/Mg 異材接合, 鍛接法, 金属間化合物, 疲労, 動的再結晶

## Dissimilar joining for producing advanced material using forge-welding method

Functional Material Processing Section; Hideki YAMAGISHI and Masaru SATO

High-productivity dissimilar bonding between A2024 aluminum alloy and AZ80 magnesium alloy with a pure titanium interlayer was achieved using forge welding with an alternating-current servo press. The processing conditions, especially the effect of intermetallic compound on joint strength and the microstructure control of AZ80 by dynamic recrystallization through the process, were investigated.