

(論文)

# 結晶粒超微細化された常温超塑性Zn-Al合金の開発と住宅用制震ダンパへの適用

## Room-temperature Super-plastic Ultra Fine Grained Zn-Al Alloys and their Application to Seismic Dampers in Wooden Detached Houses



高木敏晃<sup>\*</sup>(理博)  
Dr. Toshiaki Takagi



横井浩一<sup>\*</sup>(工博)  
Dr. Koichi Makii



榑部淳道<sup>\*\*</sup>  
Asumichi Kushibe



青木和雄<sup>\*\*</sup>  
Kazuo Aoki



東 健司<sup>\*\*\*</sup>(工博)  
Dr. Kenji Higashi



江 立男<sup>\*\*\*\*</sup>  
Li-Fu Chaing

Since the Great Hanshin-Awaji Earthquake in 1995, improving houses which lacked a qualified seismic design code became imperative. An ultra fine grained Zn-Al alloy was developed by means of TMCP (Thermo-mechanical control process). Kobe Steel used this alloy in the construction of a seismic damper for wooden houses. This alloy has super-plasticity properties at room temperature. The newly developed bending type dampers using this alloy have stable energy absorption properties and an adequate lifetime during high cycle loading. A maintenance free seismic damper can be produced using this Zn-Al alloy.

まえがき = 1995年に発生した阪神・淡路大震災による犠牲者の多くが、倒壊した建物の圧死によるものであったことから、住宅の耐震補強技術の開発が重要な課題となっている。新築の住宅においては耐震性が向上しているものの、国内には1981年の建築基準法改正前に建築され、大地震での耐震性に問題があるとされるいわゆる既存不適格住宅が、1200万戸も存在している。これらの耐震補強改修が急務となっており、近年、戸建住宅の耐震診断、耐震改修工事に補助金を交付する自治体が急増している。しかしながら、低コストかつ有効な耐震補強技術がほとんど存在しないため、住宅の耐震補強は遅々として進んでいないのが現状である。

これまでの住宅用制震ダンパとしては、粘弾性材料のせん断変形を用いたダンパ、低降伏点鋼の塑性変形を用いたダンパなどが商品化されている。粘弾性材料を用いたダンパは、機械的特性が温度依存性を持ち、金属に比べて強度が低いため小型化が難しい。そのため、ダンパを設置するための周辺工事が大掛かりとなり、設置費用が高価になる。また、低降伏点鋼を用いたダンパは、塑性変形時に加工硬化、歪劣化する特徴があり、地震後に点検、交換を行う必要がある。

本研究では、これらの課題を解決する材料として室温で超塑性を発現するZn-Al合金を開発し、住宅用制震ダンパに適用した。本合金は、大地震時には低降伏点鋼と同等の引張強度を有し、ほとんど加工硬化することなく塑性変形するため、高いエネルギー吸収性能を持つ。高層ビル用の制震ダンパとしては、すでに実物件に採用されており、今後、制震免震部材としての用途が期待される材料である。一方、塑性変形時にほとんど加工硬化しないため変形が局所に集中し、塑性変形荷重が得られず、

破断に至るといった問題点も有している。本ダンパでは、材料のこれら問題点への対策として、仕口の変形により曲げ変形が生じる曲げ型を採用することにより、座屈補剛を不要とし、実用可能な減衰性能と疲労寿命を実現した。

### 1. 室温高速超塑性 Zn-Al 合金の材料特性

超塑性材料として知られているZn-Al合金は、これまでに、200以上の高温域においては超塑性現象を発現することが報告されている<sup>1)</sup>。しかし、工業的に作製された材料においては室温で超塑性が発現したという報告はなく、理論的には、結晶サイズを微細化することにより超塑性発現温度を低下できることが知られていた。我々は、TMCP (Thermo-mechanical control process) 技術を用いることにより結晶粒を微細化し、室温においても超塑性が発現する合金を開発した<sup>2)</sup>。図1に、本合金の組織写真を示す。アルミ相に囲まれた亜鉛相の結晶粒径が、数百nmオーダーに微細化されている。

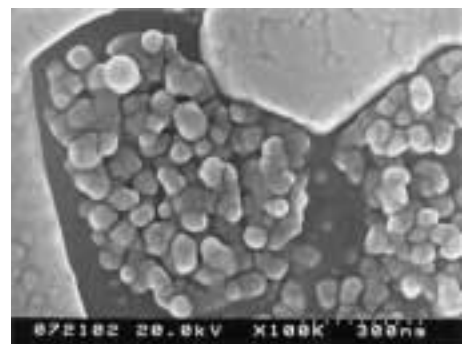


図1 Zn-Al合金のFE-SEM写真  
Fig. 1 FE-SEM image of nano crystalline Zn-Al alloy

<sup>\*</sup>技術開発本部 材料研究所 <sup>\*\*</sup>崎竹中工務店 <sup>\*\*\*</sup>大阪府立大学 <sup>\*\*\*\*</sup>科学技術振興機構

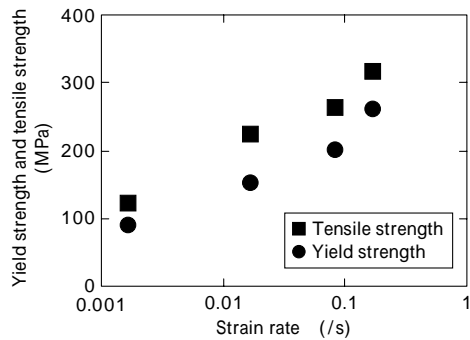


図2 降伏強度と引張強度の歪速度依存性

Fig. 2 Strain rate sensitivity of yield strength and tensile strength

図2に、Zn-Al合金の降伏強度、引張強度の歪速度依存性を示す。超塑性材料の特徴である強い歪速度感受性を示し、歪速度が大きくなるにつれて強度は高くなる。大地震時に住宅用制震ダンバに加わる最大歪速度は、0.2/s程度と想定され、この歪速度域での引張強度は300MPa以上であり、従来の極低降伏点鋼と同等以上の強度をもつことがわかる。図3に、伸びの歪速度依存性を示す。伸びにも明確な歪速度依存性がみられる。歪速度が大き

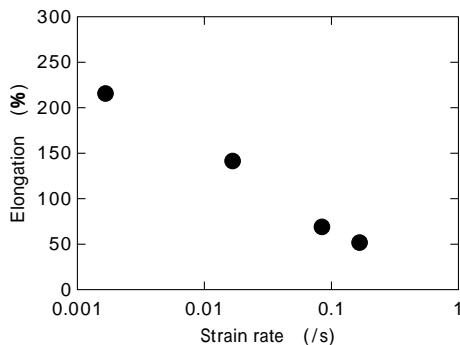


図3 伸びの歪速度依存性

Fig. 3 Strain rate sensitivity of elongation

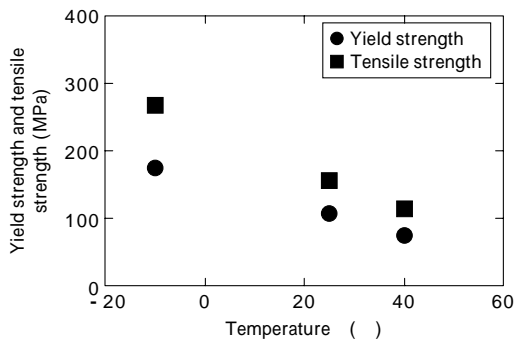


図4 降伏強度と引張強度の温度依存性

Fig. 4 Temperature sensitivity of yield strength and tensile strength

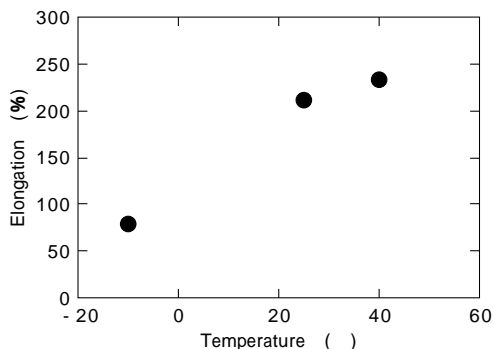


図5 伸びの温度依存性

Fig. 5 Temperature sensitivity of elongation

くなるにつれて伸びは低下するが、歪速度0.2/sにおいても50%以上の伸びを示しており、極低降伏点鋼と同等の延性を示す。

図4、図5に、降伏強度と引張強度、および伸びの温度依存性を示す。歪速度は0.002/sである。温度が下がるにつれて強度は上昇し、伸びは低下するが、-10においても50%以上の伸びを示す。

## 2. 高速成形鍛造法の検討

Zn-Al合金は、制震材料として理想的な変形性能を有し、歪劣化がほとんどないという利点を持つ一方で、溶接が困難であるため、ダンバ形状への加工は機械加工となり、材料歩留まりが低下することなどにより、加工コストがアップするという問題がある。そこで、加工コストダウン策として、超塑性特性を生かしたニアネット鍛造に着目し、高速成形鍛造の可能性について検討した<sup>3)</sup>。

図6に、成形実験における目標形状を示す。これは、すでに実用化したせん断パネル型ダンバの1/5モデルである。メカニカルサーボプレスを用いて、円柱状50×66mmのZn-Al合金のニアネット鍛造試験を行った。成形温度は150℃、成形時間は7秒である。図7に、成形後の概観写真を示す。コーナ部はやや丸みを帯びるものの、割れなく所定の形状に加工できていることを確認した。

図8に、成形後の金属組織写真を示す。図6の(a)~(c)各位置における板厚方向断面のSEM写真である。いずれの位置においても、組織的な異常は認められない。結晶粒径は、成形前の1.37μmに対し、(a)1.46μm、(b)1.37μm、(c)1.62μmと、加熱による結晶粒の成長は

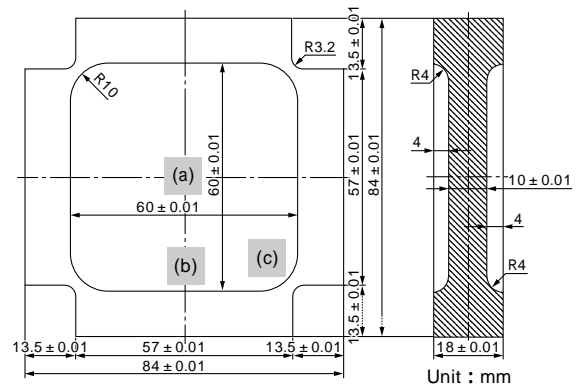


図6 目標形状<sup>3)</sup>

Fig. 6 Design of test sample for press forging<sup>3)</sup>

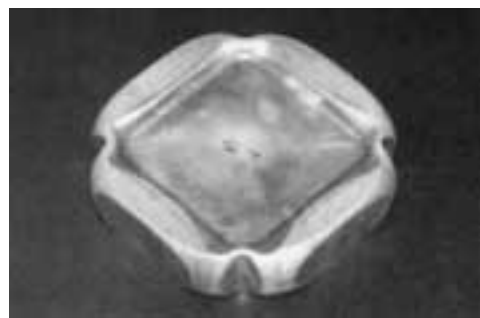


図7 鍛造成品品の概観写真<sup>3)</sup>

Fig. 7 Photograph of forged sample<sup>3)</sup>

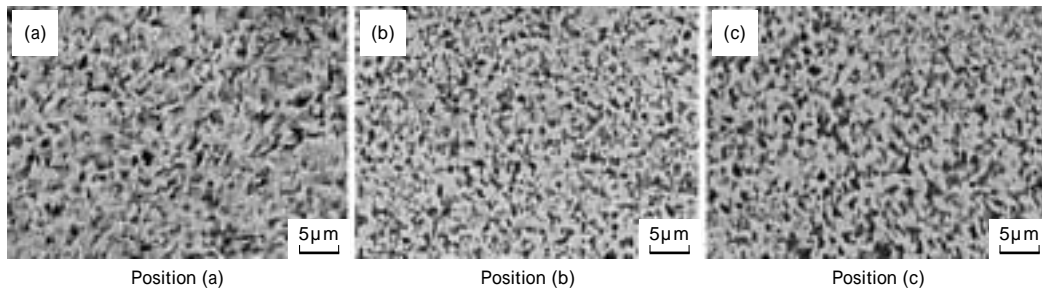


図8 鍛造材の組織写真<sup>3)</sup>  
Fig. 8 Microstructures of forged sample<sup>3)</sup>

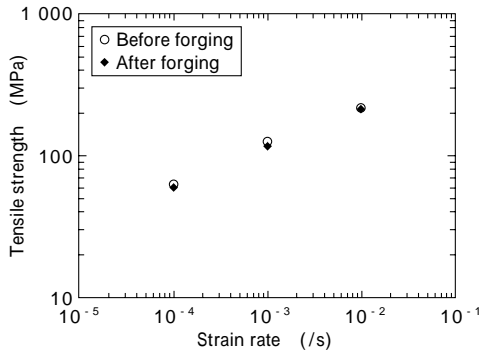


図9 鍛造前後の引張強度<sup>3)</sup>  
Fig. 9 Influence of forging process on tensile strength of samples<sup>3)</sup>

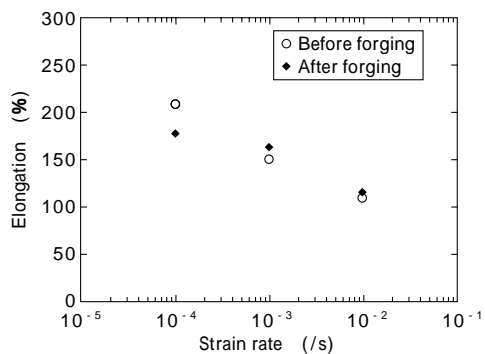


図10 鍛造前後の伸び<sup>3)</sup>  
Fig.10 Influence of forging process on elongation of samples<sup>3)</sup>

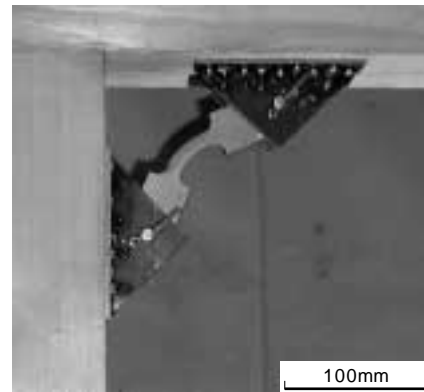


図11 住宅用制震ダンパ  
Fig.11 Seismic damper for wooden house

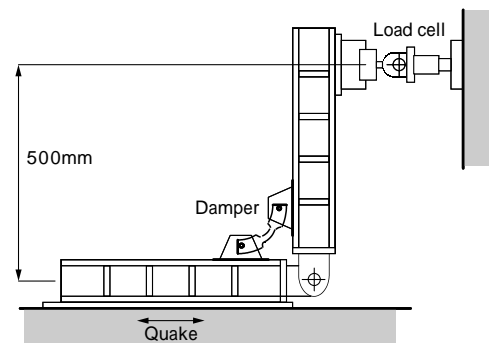


図12 加震装置の概略  
Fig.12 Schematic image of quake machine

認められない。

図9に、成形前後における材料の応力と歪速度の関係を示す。応力は、引張試験時の真ひずみ = 0.1での応力である。また、同様に、図10に破断伸びと歪速度の関係を示す。高歪速度において強加工を行ったにもかかわらず、成形前後で機械的特性はほとんど変化していない。以上より、ニアネット鍛造により、材料歩留まりの向上、および低コストかつ効率的にダンパ形状への加工ができる可能性を確認できた。

### 3. 住宅用制震ダンパの制震性能

図11に、Zn-Al合金を適用した木造用制震ダンパを示す。Zn-Al超塑性合金を取付金物を介して柱梁に固定している。仕口の変形により、円弧状の超塑性体に曲げ変形が生じる曲げ型ダンパである<sup>4)</sup>。

本ダンパの性能を確認するため、木造の柱梁仕口部を模擬したL字型の鉄骨フレームを用いて加震実験を行った。図12に示すように、フレーム上端を反力壁に、下端を振動台にそれぞれ固定し、振動台に変位を加えること

表1 加震パターン

Table 1 Conditions of quaking test

No.	Displacement (mm)	Rotation angle (rad.)	Frequency (Hz)	Cycles
1	2.5	0.005(1/200)	2.0	10
2	5.0	0.010(1/100)	2.0	10
3	10.0	0.020(1/50)	2.0	10
4	5.0	0.010(1/100)	2.0	10
5	2.5	0.005(1/200)	2.0	10
6	12.5	0.025(1/40)	2.0	To break

によって加震を行った。Zn-Al合金は、36mmの押出丸棒から機械加工にて作製した。

表1に加震パターンを示す。導入波形は正弦波とし、加震周波数は木造住宅での固有振動数として2.0Hzとした。試験は、同一試験体に対して、No.1～5の変形角を各10回ずつ順次加え、最後に、破断するまでNo.6の加震を行った。

図13に、加震No.1 2 3 6時の曲げモーメントと変形角の関係を示す。曲げモーメントおよび変形角は、測定

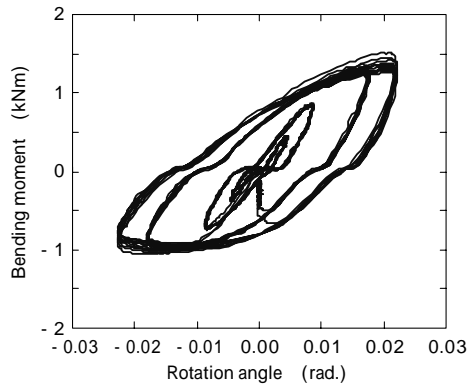


図13 曲げモーメントと変形角の関係<sup>4)</sup>

Fig.13 Hysteresis of bending type damper under condition Nos.1, 2, 3, and 6<sup>4)</sup>

した荷重および変位から、フレーム高さを用いて算出した。曲げモーメントの正側が、ダンパが引張となる方向である。変位には、加震装置のガタが含まれているものの、各加震とも同一振幅内で安定したループを示している。

図14に、加震 No.6 における 1~50cycle での曲げモーメントと変形角の関係を示す。No.1~5 の計 50cycle の加震を受けた後であるにもかかわらず、1/40 変形角での荷重変形関係は安定した性状を示し、最大荷重も 10% 程度の減少しか認められない。なお試験体は、加震 No.6 の 93cycle 目で破断した。

以上より、試験体は 1/40 の変形角まで安定した変形性状を示し、ダンパとして十分な疲労寿命を有することを確認した。

むすび = 常温超塑性 Zn-Al 合金を開発し、高速成形鍛造法の検討、および住宅用制震ダンパへの適用を検討した。高速成形鍛造については、せん断パネル型ダンパの 1/5 モデルを用いて、成形前後の組織変化および機械的特性を評価した。その結果、鍛造温度 150℃、成形時間 7 秒でプレス成形可能であることを確認し、鍛造前後で組織変化および機械的特性の劣化がほとんどないことを確認した。以上より、低コストかつ効率的にダンパ形状への加工ができる可能性を確認できた。

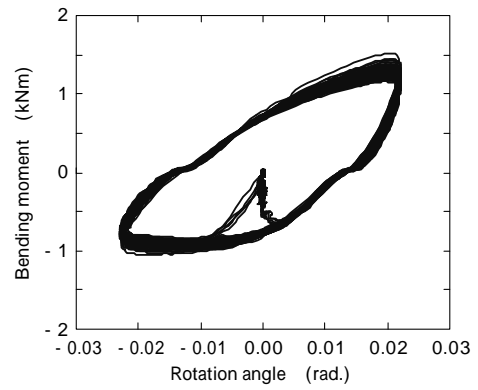


図14 曲げモーメントと変形角の関係<sup>4)</sup>

Fig.14 Hysteresis of bending type damper under condition No.6<sup>4)</sup>

また、住宅用制震ダンパへの適用については、木造の柱梁仕口部を模擬した L 字型の鉄骨フレームを用いた加震実験を行った。その結果、試験体は 1/40 の変形角まで安定した変形性状を示し、ダンパとして十分な減衰性能および疲労寿命を有することを確認した。以上より、本合金は変形前後の性能変化がほとんどなく、被災後もメンテナンスフリーなダンパであることが確認できた。

本研究の一部は、科学技術振興機構 (JST) 研究成果活用プラザ大阪による研究助成を受け、大阪府立大学および榊竹中工務店と共同で行ったものである。また、執筆にあたり多大なご協力をいただいた大阪府立大学 田中努氏に謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) Y. Motohashi et al. : Journal of Japan Institute of Light Metals, Vol.30, No.11 (1980) p.634.
- 2) 横井浩一ほか：R & D 神戸製鋼技報, Vol.51, No.1 (2001) p.34.
- 3) 榊部淳道ほか：日本建築学会学術講演梗概集 材料施工 A-1 (2004) p.575.
- 4) 青木和雄ほか：日本建築学会学術講演梗概集 材料施工 A-1 (2004) p.577.