マグネシウム鍛造材 ZK 60A 合金の機械的性質・ 疲れ強さに及ぼすメタル・フローの影響*

原田 雅行**・鈴木 敏夫**・福井 泉***

Effects of metal flow on fatigue strength and mechanical properties
of ZK60A magnesium alloy forging*

UDC: 669.721'5'296-13: 539.43

Masayuki HARADA*, Toshio SUZUKI** and Izumi FUKUI***

Effects of metal flow on mechanical properties particularly on fatigue strength of ZK60A forgings were studied. The forgings are the most strong in yield, tensile and fatigue strength in the longitudinal direction and weaken as the loading direction turns to the transverse direction. They have particularly the yield strength so weak as 13 to 15 kgf/mm² that corresponds to only a half of the strength in the longitudinal direction. The maximum elongation is achieved at angles 45° to 60° to the metal flow direction. The fatigue strength σ_w is expressed as a function of tensile strength σ_B , σ_w/σ_B 0.87-0.07 log N , where N is cycles: ZK60A magnesium forgings have a greater effect of metal flow on strength than aluminum alloy and AZ80A magnesium alloy forgings.

(Received July 18, 1983)

1. 緒 言

マグネシウム合金は実用金属中最も軽く、強度も優れているために航空機、ヘリコプター部品等にその鍛造品が多く使用されているが、最密六方晶金属のために鍛造加工の際に、底面すべりによる変形が優先しやすい¹⁾。このためマグネシウム合金鍛造品は面心立方晶のアルミニウム合金鍛造品に比べてメタル・フローの影響を受けやすく、メタル・フローの制御をより厳密に実施しなければならない。マグネシウム合金鍛造品実体の強さ、靱性値はこのメタル・フローに強く依存しており、Wilkinson 等らが AZ80 (Mg-8.5Al-0.5Zn-0.25Mn) 相当合金ピレットを円盤状に据え込んで試験した結果では、引張強さ、耐力はメタル・フローに平行な方向 (以下 L 方向) に比べて、メタル・フローが圧縮される方向 (以下 ST 方向) が約 3 割低下している²⁾。アルミニウム合金鍛造材ではメタル・フローによる機械的な特性値の低下は 1~2 割程度であり³⁾、これに比べてマグネシウム合金鍛造材の強度へのメタル・フローの影響は大きいといえる。

近年マグネシウム鍛造用合金として Zr にて結晶粒を微細化して、鍛造性と靱性値を改善した Mg-Zn-Zr 系

合金が多く用いられるようになってきているが、これらの合金系でのメタル・フローの強度、靱性値に及ぼす影響が明らかでない。また、これらのマグネシウム合金鍛造材を使用して繰り返し荷重がかかる場合、疲れ強さが重要な因子となるが、マグネシウム合金鍛造材でのメタル・フローと疲れ強さの関係が明確となっていない。

今回鍛造性が優れ、強度・靱性値の良好な Mg-6Zn-0.5Zr からなる ZK60A 合金押出棒を鍛伸して、強度、靱性値および疲れ強さに及ぼすメタル・フローの影響を明らかにした結果を報告する。

2. 実験方法

ダウ・ケミカル社製の 7 インチ径 (175 mm ϕ) の ZK 60A 押出棒を実験のための素材として用いた。Table 1 に供試材の化学組成を示す。Zn の成分値は規格値下限の 4.8%、また結晶粒微細化剤の Zr は 0.60% である。径 175 mm、長さ 600 mm の押出棒を 300~330°C の温度にて鍛伸して、断面が 180 $\times$ 100 角で、長さ 900、すなわち鍛伸比 1.33 の素材 2 個を作製した。鍛造後 1 個は水槽中に鍛造焼入れを行い、他の 1 個はそのまま放冷した。

鍛造材と押出棒を 150°C $\times$ 24 hrs にて T5 処理を行った後、L 方向、L 方向と 30°, 45°, 60° の角度および L 方

* 第64回軽金属学会春期大会 (58-5) にて発表を行った。

** ㈱神戸製鋼所名古屋研究室 (名古屋)。Nagoya plant Kobe Steel Ltd. (Nagoya)。

*** ㈱神戸製鋼所 名古屋研究室 (名古屋) (現在 菊水工業㈱(神戸))

Nagoya plant Kobe Steel Ltd. (Nagoya), (Present address, Kkusi Kogyo (Kobe))。

Table. 1 Chemical composition and mechanical properties of test alloy.

	chemical composition (%)				mechanical properties (L)		
	Zn	Zr	impurity Total	Mg	σ_B (kgf/mm ²)	σ_T (kgf/mm ²)	δ (%)
	4.816	0.596		bal.	—	—	—
QQ-M-40b	4.8~6.2	>0.45	<0.30	bal.	29.5	18.3	7

向と垂直な方向（以下鍛造材は LT 方向，押出棒は T 方向）よりそれぞれ平行部 60 mm，幅 12.5 mm，厚さ 5 mm，長さ 150 mm の板状引張試験片を各 4 本採取して引張試験に供した。疲労試験片は鍛造焼入れした素材からのみ前記の L 方向，L 方向と 30°，45°，60°，LT 方向より平行部径 12 mm，長さ 170 mm の試験片各 10 本採取して，3,000 r.p.m. の小野式回転曲げ疲労試験に供した。なお，機械加工面表面粗さの影響を除去するため，試験片平行部は機械加工後バフ仕上を行った。これらの引張試験片，疲労試験片の採取位置を **Fig. 1**，試験片形状を **Fig. 2** に示す。

鍛伸材および押出棒のメタル・フローに平行な断面（以下 L-LT 面），メタル・フローに垂直断面（以下 LT-ST 面）を MIL-I-6866B に従って蛍光浸透探傷検査を行い，介在物，フラックスの混入等の欠陥状態を調べた。また L-LT，LT-ST 面のマクロ研磨を行ってメタル・フローを確認するとともに，**Fig. 3** に示す位置より L，LT，ST 3 方向より試料を採取して光学顕微鏡にてミクロ組織観察を行った。

3. 実験結果および考察

3.1 組織観察結果

鍛造材の L-LT 面の蛍光浸透探傷検査結果を **Photo 1** に示す。検査の結果押出棒，鍛造材いずれも介在物，フラックス等の有害な欠陥は認められず健全である。

押出棒，鍛造材の L-LT 面のマクロ組織観察結果を **Photo 2** に示す。L-LT 面の L 方向すなわち押出方向ならびに鍛伸した方向のマクロ組織にメタル・フローが認められる。また鍛造材，押出棒いずれも中央部が外周部に比べてメタル・フローがより明瞭である。

押出棒の L，T 方向のミクロ組織観察結果を **Photo 3** に示す。ミクロ組織のメタル・フローは押出し方向に流れており，中央に包晶の Zr を核とする有核組織が押出し方向に圧縮されて楕円状となつた繊維状の組織となつている。押出し方向と直角な T 方向では繊維状組織の切断面が現れ，鍛造材のような結晶粒界は明瞭には現れないが，鍛造材によく似た組織を呈している。押出棒のメタル・フローは外周部で強く，中間部と中心部でのそれは弱くなつているのが観察された。これは，押出時の

Fig. 1 Sampling direction of test pieces. a) Test piece for tensile test
Fed. Std. No. 151b ASTM E-8 b) Test piece for fatigue test
Ono type**Fig. 2** Dimensions of test pieces. **Fig. 3** Sampling position of microstructure test piece.

歪量分布を見ると押出棒表層での歪が最も大きく，中心部では最も小さくなり，表層より中心側に少し入ると中心との歪量の差が小さくなる⁴⁾ためと考えられる。

鍛造材の L，LT，ST 方向のミクロ組織観察結果を **Photo 4** に示す。メタル・フローは鍛伸方向に認められ，押出棒と同様な繊維状組織となつている。鍛伸方向と直角断面の LT-ST 面ではメタル・フローは認められず，繊維状組織の切断面が現れている。試料中心部および外周部について表層 A 部のメタル・フローは L-LT

L-LT section of penetrant inspection

Photo 1 Liquid penetrant inspection of ZK60A. **Photo 2** Macrostructure of ZK60A. **Photo 3** Microstructures of extruded ZK60A Magnesium alloy.

面, L-ST 面ともほぼ等しいが, 中間部 B, 中心部 C の L 方向のメタル・フローは L-LT 面に比べて L-ST 面の方が強い。また, 試料中心部断面では L-ST 面の L 方向のメタル・フローを比較すると表層 A 部が弱く, 中間部 B および中心部 C が強い流れとなり, L-LT 面の L 方向のメタル・フローとは逆の結果になっている。これらは $175\phi \times 600$ l の押出棒を一辺が 160 mm の四角形にして, 次に 180×100 mm 角で長さ 900 mm と押出し方向に鍛伸した場合, L-ST 面は ST 方向に圧縮されるとともにさらに L 方向のメタル・フローが強くなる。一方, L-LT 面は L 方向とともに LT 方向のメタル・フローが生じ, 押出棒の L 方向のメタル・フローが弱くなったためと考えられる。また, 表層 A 部での L-ST, L-LT 面のメタル・フローに差は認められないが, これは鍛伸の

際, 金敷に接する面, あるいは素材端面になったために, ST, LT 方向いずれも歪量に大きな差は生ぜず⁵⁾に押出棒のメタル・フローが残存したと考えられる。

以上マクロ・ミクロの組織観察を通して, マクロ組織は材料中央部のメタル・フローが明瞭であるが, ミクロ組織では表層部のメタル・フローが細かく, 表層部より少し内側から中心部にかけてほぼ一様で若干粗い組織をしている。これより引張試験片および疲労試験片の採取位置は試料端面, 表層を除いて組織の様な試料中心ならびに中間部とし, 比較のために表層からも採取した。

3.2 メタル・フローの機械的性質に及ぼす影響

押出棒また鍛造材のメタル・フローと各角度を有す試験片の引張試験結果の一覧を **Table 2** に, またメタル・フローと機械的性質の関係を **Fig. 4** に示す。押出棒, 鍛造材いずれもメタル・フローと平行な L 方向が最も引張強さ, 耐力がすぐれ, 角度が増すにつれて低下し, 特にメタル・フローと 45° までの低下が著しい。鍛造材の L 方向の引張強さ, 耐力は各々 $34 \sim 35 \text{ kgf/mm}^2$, $27 \sim 28$

Photo 4 Microstructures of the forged ZK60A magnesium alloy.

kgf/mm² がメタル・フローと90°すなわち LT 方向では 26~27 kgf/mm², 13~14 kgf/mm² と L 方向に比べて、引張強さは約 2 割、耐力は約 5 割低下する。硬さにはメタル・フローの影響は認められず、押出棒、鍛造材いずれも H_B 69 である。一方伸びは、L 方向では 11~12% が、メタル・フローと 45~60°の角度では 15~28% と最も良好な値を示し、LT 方向ではメタル・フローと 45~60°の角度に比べて若干低下し、13~20% の値を示す。

材料の表層、中心そして中間部とを比較すると、強さ、耐力には差は認められないが、伸びは鍛造材では中心部、中間部に比べて、表層部のそれは若干良好である。また、ST 方向より採取した試験片の機械的性質は LT 方向と比べて明瞭な差は認められない。

鍛造材と押出棒を比較すると引張強さ、耐力は L 方向では鍛造材が優れ、LT 方向では劣っているが、伸びについては明瞭でない。これは鍛伸に際して L-ST 面の

Fig. 4 Relation between metal flow and mechanical properties of ZK60A alloy.

メタル・フローが強くなるために強度が向上したと考えられる。また、鍛造焼入れしたものは、焼入れしないものに比較して、引張強さで 0.5~1.5 kgf/mm², 耐力で ~1 kgf/mm² 高くなるが、これは鍛造焼入れせずに放冷したものは Mg-Zn 化合物の固溶量が少なく、後工程での T5 処理に際して析出量が少なくなるためと考えられる。

L 方向、メタル・フローと 45°の角度ならびに LT 方向に引張った試験片破面のミクロ組織観察結果を Photo 5, 走査型電子顕微鏡による破面観察結果を Photo 6 に示す。ミクロ組織観察結果によれば、L 方向と平行に引張ったものでは繊維状組織を引きちぎるように繊維組織の中間で破断しているが、メタル・フローと 45°ならびに LT 方向に引張ったものは繊維組織はそのまま、その粒界で破断している。また、走査型電子顕微鏡による破面観察では、破面は延性破壊をしたディンプルの形成が認められるが、L 方向で引張った破面は凸凹が多く、メタル・フローと 45°の角度ならびに LT 方向では凸凹が少なく、平滑となる。ZK60A 合金鍛造材のミクロ組織は中央に Zr のコアを有す繊維状の組織を示すが、微小硬さ計を用いての測定によると、これら各組織の硬さは繊維状組織中央のコア部が最も硬く、繊維状組織の粒界部が最も軟らかい⁹⁾。メタル・フローと 45°ならびに LT 方向で引張ったものでは引張方向と垂直な面に繊維状組織の粒界の並ぶ面が現れ、この最も軟らかい粒界で破壊が伝播している。一方、L 方向では粒界は引張方向と垂直に一列になつて並んでおらず、粒界を伝つて破壊が伝播するには伝播距離が長くなり、破壊しにくいと考えられる。このため粒界で破壊するとともに、一部は最も硬い繊維状組織の中間部で破断している。これらの結

Table 2 Tensile properties of ZK60A forgings.

	Angle of Metal Flow	Tensile strength (kgf/mm ²)	Yield Strength (kgf/mm ²)	Elongation (%)	Brinell Hardness (10/500)	Fracture location
Forging (quenched in water)	0°	34.1	26.5	11.5	69.1	B
		34.7	27.8	11.5	69.1	B
		34.5	27.7	11.0	69.1	A
		34.5	27.0	11.0	69.1	A
	Average	34.5	27.3	11.3	69.1	
	30°	29.3	19.1	20.0	69.1	A
		29.9	19.6	23.0	69.1	A
		30.4	19.8	18.5	69.1	B
		30.7	20.3	17.5	69.1	B
	Average	30.1	19.7	19.8	69.1	
	45°	28.8	16.3	22.0	69.1	A
		28.7	17.1	25.5	69.1	A
		28.6	17.4	15.5	69.1	C
		28.1	17.2	20.0	69.1	B
	Average	28.6	17.0	20.8	69.1	
	60°	29.3	16.9	27.5	69.1	A
		28.4	14.9	20.5	69.1	A
		27.3	15.1	15.0	69.1	B
		26.4	14.6	17.0	69.1	C
	Average	27.6	15.4	20.0	69.1	
	90°	26.1	14.1	20.0	69.1	C
		26.9	13.3	15.0	69.1	B
		25.5	13.2	12.5	69.1	C
		25.8	13.0	16.0	69.1	B
	Average	26.1	13.4	15.9	69.1	
Extrusion	0°	33.4	27.7	13.5	69.1	B
		32.9	27.1	12.0	69.1	B
		32.4	26.2	12.5	69.1	A
		32.1	27.0	12.5	69.1	A
	Average	32.7	27.0	12.6	69.1	
	30°	29.5	20.7	18.5	69.1	A
		29.6	20.7	19.0	69.1	A
		29.7	20.2	19.0	69.1	A
		29.8	18.5	19.0	69.1	A
	Average	29.7	20.0	18.9	69.1	
	45°	28.5	16.7	17.5	69.1	A
		28.6	16.7	17.0	69.1	B
		28.6	16.5	19.0	69.1	A
		28.6	16.7	17.5	69.1	B
	Average	28.6	16.7	17.8	69.1	
	60°	28.9	15.8	19.0	69.1	A
		29.0	15.7	20.0	69.1	A
		29.0	15.4	20.0	69.1	A
		28.9	15.3	20.0	69.1	A
	Average	29.0	15.6	19.8	69.1	
	90°	28.1	13.0	17.5	69.1	B
		28.2	13.0	18.0	69.1	A
		28.2	13.1	18.5	69.1	A
		28.2	13.2	15.5	69.1	A
	Average	28.2	13.1	17.4	69.1

Photo 5 Microstructures of fracture surfaces.

Photo 6 Scanning electron micrographs of tensile fractured surfaces.

果、メタル・フローと45°の角度並ならびにLT方向では強度が低く、伸びが優れた結果となり、一方、L方向では強度が高く、逆に伸びが劣る結果になったと考えられる。

Wilkinson らが AZ80 相当材を据え込んだ結果では、L方向の引張強さ、耐力は22.6 kgf/mm²、17.7 kgf/mm²であつたが、ST方向では各々15.8 kgf/mm²、13.8 kgf/mm²となり、引張強さは約3割、耐力で約2割低下している²⁾。一方、本実験によれば ZK60A 合金鍛造材では引張強さが約2割、耐力が約5割と耐力の低下が著しいが、AZ80A 合金に比べて ZK60A 合金では Zr のコアを有す繊維状組織の特徴が現れたと考えられる。また、アルミニウム合金鍛造材7075、2014合金のメタル・フローと機械的性質はL方向に比べてLT方向の引張強さ、耐力は約1.5割、伸びは9割低下し⁷⁾、マグネシウム合金鍛造材に比べてメタル・フローの強さ、耐力、伸びへの影響は異なる。マグネシウム合金鍛造材、とくに ZK60A 合金鍛造材はアルミニウム合金鍛造材に比べて耐力へのメタル・フローの影響が大きく、強度部品に使用する場合はメタル・フローの制御に注意を払わなければならない。

3.3 メタル・フローの疲れ強さに及ぼす影響

鍛造材のメタル・フローとの各方向より採取した試験片の小野式回転曲げ疲労試験結果の一覧をTable 3に示す。この結果をメタル・フローの各方向でまとめたS-N曲線をFig. 5に示す。L方向の疲れ強さが最も良好で、メタル・フローとの角度が増すにつれて疲れ強さは

Fig. 5 S-N curves of ZK60A magnesium alloy forgings.

低下するが、45°、60°、LT方向ではほとんど疲れ強さに差は認められない。10⁷サイクルでの疲れ強さはL方向では13.5 kgf/mm²、メタル・フローと30°の角度での試料は12.0 kgf/mm²、45°、60°、LT方向でのそれは11.0 kgf/mm²となり、L方向に比べてLT方向は約2割低下する。

疲れ強さの測定には時間と手間がかかるために静的な強度より疲れ強さが推定できれば便利である。疲れ強さを引張強さ、耐力、伸び各々で除したものと繰返し数を対数でとつたものの関係を調べた結果、メタル・フローとの角度によらず、疲れ強さを引張強さで除した商(以下疲れ比)と繰返し数の対数は直線関係で整理で

Table 3 Fatigue properties of ZK60A Forgings.
rotating speed: 3000 rpm

Angle of Metal Flow	T.P. NO.	Loading Stress (kgf/mm ²)	Cycles (×10 ³)	Remark
0°	1	10	122743	Not Fractured
	2	12	149086	Not Fractured
	3	13	66401	
	4	13.5	90329	
	5	14	89141	
	6	14.5	40851	
	7	15	53008	
	8	16	2627	
	9	16	9877	
	10	17	1257	
30°	1	12	213832	Not Fractured
	2	12.5	28336	Fractured at chacked part
	3	12.5	19710	Fractured at chacked part
	4	12.5	35213	
	5	13	52745	
	6	13.5	12906	
	7	14	3649	
	8	16	844	
45°	1	12	169881	Not Fractured
	2	12.5	42103	
	3	13	13115	
	4	13.5	1571	
	5	14	3501	
	6	16	162	
	7	16	177	
60°	1	11	121207	Not Fractured
	2	11.5	39267	
	3	12	45350	
	4	13	12272	
	5	13.5	9905	
	6	14	2421	
	7	16	114	
	8	16	145	
90°	1	10	121395	Not Fractured
	2	11	99056	
	3	11.5	13919	
	4	11.5	9126	
	5	11.5	13600	
	6	12	9464	
	7	13	2100	
	8	14	592	
	9	16	80	
	10	16	178

Fig. 6 Relation between fatigue ratio and cycle of ZK60A magnesium alloy forgings.

き、この結果を **Fig. 6** に示す。この結果疲れ強さは次式で表される。

$$\sigma_w/\sigma_B=0.87-0.07 \log N$$

σ_w : 疲れ強さ σ_B : 引張強さ

N : 繰り返し数

ZK60A 合金鍛造材の10⁷サイクルの疲れ比は0.36~0.42となる。すなわち疲れ限度は引張強さに0.36~0.42を乗ずればよい。高力アルミニウム合金7075, 2014材の疲れ比は0.30~0.40であるが⁹⁾、マグネシウム合金 ZK60A 材も、これらの高力アルミニウム合金とよい対応を示す。

L, LT 方向の疲労試験片破面の走査型電子顕微鏡による観察結果を **Photo 7** に示す。L, LT 方向での破面形態に明瞭な差は認められず平滑な破面となつている。また、ストライエーションの形成は明瞭でない。これらの破面形態は脆性ストライエーションの形成⁹⁾により疲労破壊が進展したものと考えられる。マグネシウム合金鍛造材 ZK60A 材の場合引張強さと疲れ強さには強い相関があるが、これらの破面観察結果によると引張強さが同じ場合には、伸び値を改善すればさらに疲れ強さが向上することが期待できる。

以上マグネシウム合金鍛造材 ZK60A 合金のメタル・フローの機械的性質に及ぼす影響を調べた結果、引張強さ、耐力、疲れ強さに対するメタル・フローの影響は大きく、特に耐力はL方向に比べてLT 方向では約5割低下し、従来の AZ80A 合金鍛造材またアルミニウム合金鍛造材と様相が異なることが明確となつた。これらの結果、マグネシウム合金鍛造品 ZK60A 材を構造部材として使用する場合に主応力、あるいは曲げ荷重のかかる方向に応じてメタル・フロー制御が重要となる。これらのメタル・フロー制御にあたっては型鍛造の方案が一段と

Photo 7 Scanning electron micrographs of fatigue fractured surfaces.

重要視される。また、マグネシウム合金鍛造品の強度向上のためには鍛造温度、圧下率を適切に選択して加工硬化による効果^{10),11)}もメタル・フロー制御とともに重要で、これらも、より精密にコントロールすることが必要と考えられる。

4. 結 論

マグネシウム合金 ZK60A 押出棒を鍛伸して、メタル・フローの強度、疲れ強さに及ぼす影響を調べた結果、次の事柄が明らかとなった。

(1) 引張強さ、耐力はメタル・フローと平行な L 方向が最も優れ、メタル・フローとの角度が増すにつれて低下し、これと垂直な LT 方向の強さが最も低い値を示す。一方、伸びはメタル・フローとの角度 45°~60° が最も良好である。代表的な機械的性質を次に示す。

σ_B (引張強さ)	σ_y (耐力)	δ (伸び)
L 方向: 34~35 kgf/mm ² (100)	27~28 kgf/mm ² (100)	11~12% (100)
L T 方向: 26~27 kgf/mm ² (76)	13~14 kgf/mm ² (49)	13~20% (140)

() は L 方向の機械的性質の特性値を 100 として L T 方向の特性値を示す。

(2) 引張試験片の破面をミクロ組織観察または走査型電子顕微鏡で観察した結果、L 方向では繊維状組織の中間で破断しているが、メタル・フローとの角度が 45° 以上になると繊維状組織の粒界で破断している。また、L 方向で引張った破面は凸凹が多く、メタル・フローとの角度が大きくなると凸凹が少なく、平滑となつている。

(3) 小野式回転曲げ疲労試験の結果、L 方向が 13.5 kgf/mm² と最も優れ、メタル・フローとの角度が増すに従い低下し、LT 方向では 11.0 kgf/mm² となる。

疲れ強さと他の機械的性質の相関を調べると疲れ強さは引張強さで整理され、

$$\sigma_w/\sigma_B = 0.87 - 0.07 \log N$$

σ_w : 疲れ強さ σ_B : 引張強さ N : サイクル数
で表される。10⁷ サイクルでの疲れ比は 0.36~0.42 となる。

参 考 文 献

- 堀内他著: マグネシウム便覧 (1975), 51, 軽金属協会
- R. G. Wilkinson and F. A. Fox: *J. Inst. Metals* **76** (1950), 473.
- 立松: 塑性と加工, **10** (1969), 573.
- 工藤訳, E. G. Thomson 他著: 金属塑性加工の力学 (1967), 300, コロナ社
- 五弓訳, A. Geleji 著: 金属塑性加工の計算 (上), (1964), 71, コロナ社.
- マグネシウム委員会: 軽金属 **32**, (1982), 498.
- W. T. Edmunds and R. C. Doyd: *Journal of the Institute of Metals* **83** (1954~55), 247.
- 軽金属匠延工業会編: アルミニウム・ハンドブック, (1978), 42, 軽金属協会.
- 北川他著: フラクトグラフィ (1977), 90, 培風館.
- Emely 著: Principles of Magnesium Technology (1966), 484.
- W. Unsworth: *A new high strength wrought Mg alloy* (M.E.L.).