

マグネシウム合金の疲労強度解析

渡辺広光 Hiromitsu Watanabe

キーワード 金属疲労, 非鉄金属, マグネシウム合金, 有限要素法, 分子動力学

概要

形状		疲労限度 σ_w (MPa)	切欠き 係数 β	
平滑		90	—	
切欠き	穴直径 (mm)	69	1.3	
	穴個数			
	3.0	1		
	1.5	2	57	1.6
	1.0	3	58	1.6
	6.0	1	64	1.4
3.0	2	65	1.4	
2.0	3	53	1.7	

マグネシウム合金の平面曲げ疲労限度と小穴付きの切欠き係数

本研究では、比強度が高くかつ希少金属をほとんど含まないマグネシウム合金を製品適用するための基礎検討を行った。

特に製品設計で重要となる疲労寿命について、機械的な疲労試験を行い、基本強度特性である疲労限度を明らかにした。次に任意形状の部品への適用のため、形状による疲労限度の低下率である切欠き係数を実験的に求めた。さらに有限要素法による応力解析から、切欠き係数の推定方法を検討した。

最後に考察として、分子動力学計算を行い、繰り返し荷重が作用した場合の応力とひずみの変化挙動について考察を加えた。

これらの基礎検討を重ねていき、更なる製品の信頼性向上や小形・軽量化を推進する予定である。

1 まえがき

地球環境問題及び省エネルギー、さらに新興国との技術競争の観点から、製品の小型化や寿命評価技術の開発が強く望まれている。この対策の一つとして、比強度が高くかつ希少金属を使わない新材料の採用が必要になってきている。

従来から製品の改良や新製品の開発では、特性の良い新材料の採用は、仕様を満たす有用な方法として活用されている。一方、製品への適用に際しては、長期的な信頼性や製作の自由度に対しても十分な検討が必要である。

そこで本研究では、高比強度材として有望なマグネシウム合金について⁽¹⁾、機械的な疲労試験によって、S-N曲線（応力の大きさと破断回数との関係図）や切欠き係数（応力集中による疲労強度の低下率）を明らかにした。本稿では、有限要素法による応力

解析から切欠き係数を推定する方法を検討したので紹介する。

2 実験方法

2.1 試験材料

実験に供した材料はJISH4204:2011・AZ31のマグネシウム合金押し出し材で、その化学成分及び機械的性質を第1表に示す。また本材料の機械的特性は、規格によると引っ張り強さが200MPa以上で、SS400などの低炭素鋼と比べて強度は低いが、

第1表 マグネシウム合金押し出し材（JIS H 4204）化学成分

マグネシウム合金押し出し材（JIS H 4204）化学成分を示す。

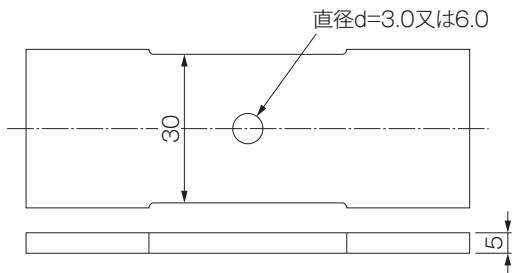
(wt. %)						
Al	Zn	Mn	Si	Fe	Cu	Ni
2.9	0.9	0.38	0.026	0.004	0.002	0.001

第2表 切欠き試験片における穴の直径とその個数nの組み合わせ

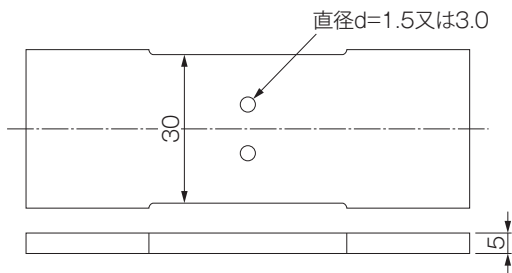
切欠き試験片における穴の直径とその個数nの組み合わせを示す。

穴の直径d (mm)	穴の個数n (個)		
	1	2	3
3.0	1.5	1.0	
6.0	3.0	2.0	

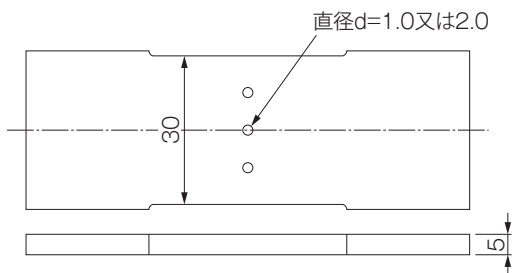
単位：mm



(a) 切欠き試験片 (n=1個)



(b) 切欠き試験片 (n=2個)



(c) 切欠き試験片 (n=3個)

第1図 試験片形状寸法

切欠き試験片の同一断面係数で、切欠きの個数が1個の場合、2個の場合、3個の場合を示す。

A7075などのアルミニウム合金の非熱処理材と同レベルの強度である。

なおマグネシウム合金の比重は1.7で、鉄の7.9と比べて約1/5と実用金属で最も軽く、さらに地球上で6番目に豊富な金属と言われており、近年着目されている材料である。

2.2 疲労試験機

繰り返し荷重（応力）を作用させる試験には、平面曲げ疲労試験機（株東京衡機製 PBF30）を用いた。本機は、任意の一定振幅の強制変位を 1500min^{-1} で負荷でき、試験片固定部に取り付けられているロードセルで試験中の曲げモーメントを検出している。

本実験での応力 σ は、このロードセルで検出されたモーメントMを、試験前の試験片寸法から算出した断面係数Zで除した値を用いる。なおモーメントは、後で述べるように繰り返し数とともに変化するため、曲げモーメントは試験が安定した200回の時を初期値とした。また破断の判定は、材料の損傷によって変位一定下でもモーメントが低下するため、この低下率が初期値の10%と顕著に表れたときを破断寿命とした。

2.3 疲労試験内容

はじめに平滑試験片で疲労試験を行い、応力集中がない場合の疲労強度を求めた。次にボルト穴などの応力集中部を模擬した小穴を有する試験片で、疲労強度の低下率を実験的に求めた。第2表に切欠き試験片における穴の直径とその個数nの組み合わせを、第1図に試験片形状寸法を示す。

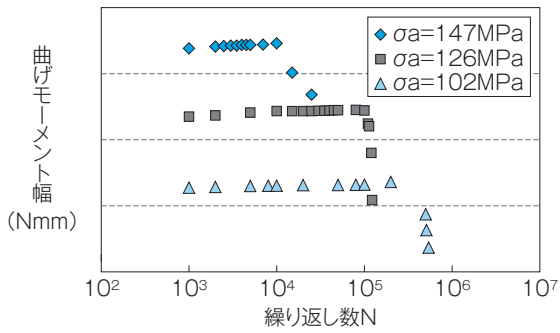
3 疲労試験結果

3.1 繰り返し数によるモーメント変化

繰り返し応力振幅 σ_a の初期値が147MPa、126MPa及び102MPaの場合における、繰り返し曲げモーメント振幅Mと繰り返し数Nの関係を第2図に示す。 σ_a が大きい147MPa（◆印）は、繰り返し数Nが 1×10^4 回まで、Nの増加とともにMが増加している。

その後、 1×10^4 回を越えた時点でMが13,000Nmmから12,000Nmmまで急激に減少しており、材料特性が変化していることが分かる。このときのMの減少率が10%を越えた回数は 2.5×10^4 回であり、この回数を破断の回数と定義した。

次に σ_a が小さくなった126MPa（■）の場合も、 1×10^4 回までMがわずかに増加して、急激に減少し



第2図 変位振幅一定の疲労試験中の荷重（曲げモーメント）変化

繰り返し変形を与えると、変形量（負荷応力）が大きい場合は、曲げモーメントが徐々に上昇してその後減少している。一方、負荷応力が小さいとほぼ一定のまま、ある回数で急激に減少する。

ている。さらに σ_a が小さくなった102MPa (▲) の場合では、Mの増加はほとんど無く、Nが増えると急激にMが減少する結果であった。

3.2 平滑材のS-N曲線

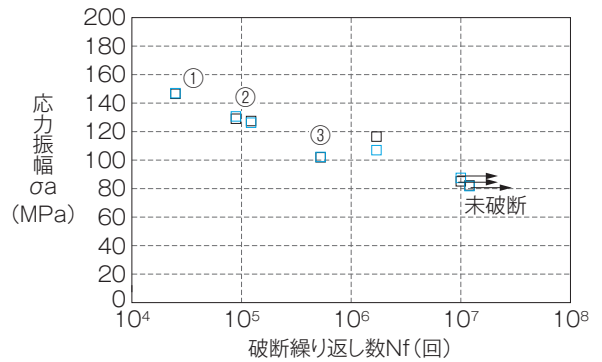
第3図に疲労試験結果（応力振幅 σ_a と破断繰り返し数Nfの関係）を示す。図中の矢印は未破断（打ち切り）を示す。(a)では、 1×10^7 回で σ_a が90MPa以下で未破断となっており、このことから本材料の疲労限度は約90MPaであることが明らかになった。

この値は、比重が2.8程度のアルミニウム合金の 5×10^8 回の疲労強度⁽²⁾と対比すると、超々ジュラルミン（A7075系）に比べて低強度であるが、耐食アルミニウム合金（A6000系）と同等の強度を有している。このことから、同一質量とすると強度はアルミニウム合金と疲労限度は遜色がない。

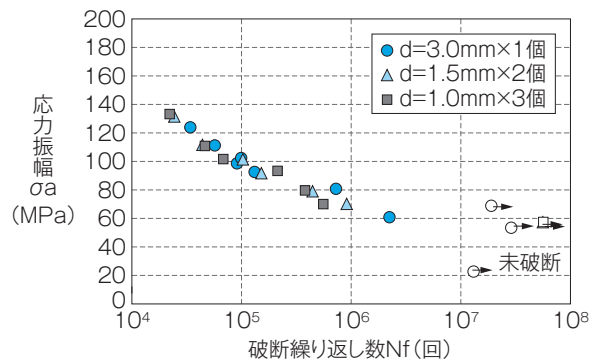
3.3 切欠き材のS-N曲線

先に平滑材の疲労特性を求めたが、実際の製品にはボルト穴や角部などの形状が変化する部分がある。このような形状が大きく変化するところでは、応力が集中して、同一荷重であっても局部的な応力が高くなる。このため、実際の設計では応力集中による強度の低下率を定量的に推定する必要がある。

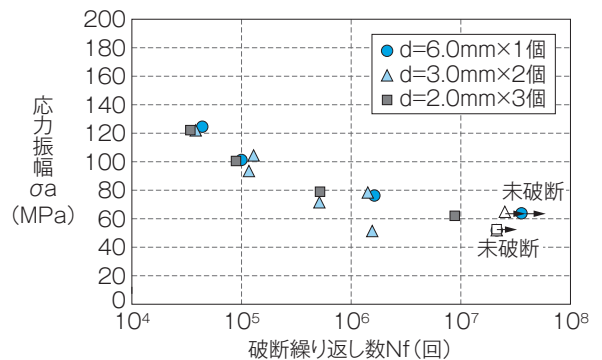
そこで、先に実験した平滑試験片に小さな穴を設けた場合について疲労試験を行い、疲労限度の減少度合い（切欠き係数）を求めた。



(a) 平滑材の場合



(b) 穴直径の合計が3mmの場合



(c) 穴直径の合計が6mmの場合

第3図 疲労試験結果（応力振幅 σ_a と破断繰り返し数Nfの関係）

第2図で示した曲げモーメントの低下率が10%以上となる回数を破断と見なしたときの、繰り返し応力振幅の大きさと破断回数（回）の関係を示しており、S-N曲線と言う。応力振幅が大きいと短寿命で破壊するが、低応力になると破断しなくなる限界があり、このときの応力を疲労限度と言う。強度設計の基準となる有用な情報が得られる。

(b)は、**第2表**に示した切欠きの条件の中で、1枚の試験片の小穴径の合計が3.0mmと同一で、見かけの断面係数を同一とした場合の試験結果を示す。 $d=3.0\text{mm}$ (●印) の場合の疲労限度 σ_{wk} は69MPaである。この値と先の平滑材の疲労限度 σ_w を対比すると、強度の低下率である切欠き係数 β は、以下のとおりとなる。

第3表 疲労試験による疲労強度低下率（切欠き係数）の算定

第3図で示したS-N曲線から疲労限度を求めた。さらに平滑試験片と切欠き試験片の疲労限度を式(1)で対比した値を切欠き係数と言い、穴などの不連続部分の強度低下率を示している。この値が大きいと、強度の低下が大きいと見える。

形状		疲労限度 σ_w (MPa)	切欠き係数 β	
平滑		90	—	
切欠き	穴直径 (mm)	69	1.3	
	穴個数			
	3.0	1		
	1.5	2	57	1.6
	1.0	3	58	1.6
	6.0	1	64	1.4
3.0	2	65	1.4	
2.0	3	53	1.7	

$$\beta = \sigma_w / \sigma_{wk} = 90 / 69 = 1.3 \dots\dots\dots(1)$$

同様に、1個の切欠きが小さくなり2個になったd=1.5mm (▲) の場合は $\sigma_{wk}=57\text{MPa}$ となり、 β は1.6とd=3.0mmの場合に比べ強度が低下した。さらにdが小さく1.0mmで3個の場合 (●) は $\sigma_{wk}=58\text{MPa}$ となり、 β は1.6とd=1.5mmと同等の結果となった。

(c)は、穴径を2倍に大きくして小穴径の合計が6.0mmと同一で、見かけの断面係数を同一とした場合の結果である。d=6.0mm (●印) の場合の疲労限度 σ_{wk} は64MPaとなり、 β は1.4となった。次に、切欠きが小さくd=1.5mmで2個 (▲) の場合は、 $\sigma_{wk}=65\text{MPa}$ で β は1.4となり、d=6.0mmの場合とほぼ同等となった。さらにdが小さくなった2.0mmが3個 (●) の場合は $\sigma_{wk}=53\text{MPa}$ となり、 β は1.7と強度が低下する傾向が明らかになった。


第3表に疲労試験による疲労強度低下率(切欠き係数)の算定を示す。

4 応力解析による疲労強度推定

過去の研究成果⁽³⁾⁻⁽⁵⁾は、回転機などのシャフトに使われている中炭素鋼や低合金鋼などについて、繰り返し効果を考慮した応力・ひずみ曲線で非線形応力解析を行い、ミーゼス相当応力で算定した応力集中係数が、疲労試験で得られた切欠き係数と良い相

第4表 応力解析を用いて算定した疲労強度低下率（切欠き係数）の推定

有限要素法を用いて各試験片の応力分布を求めた。この結果からミーゼス相当応力で算定した応力集中係数(表中の分布の最大応力値/公称応力)を各試験片形状で対比すると、切欠き係数と良い相間があることが分かる。

形状		解析で推定した切欠き係数の比率 (穴直径3.0mm, 1個を基準)	実験で求めた切欠き係数の比率 (穴直径3.0mm, 1個を基準)	
切欠き	穴直径 (mm)	1.0	1.0	
	穴個数			
	3.0	1		
	1.5	2	1.1	1.2
	1.0	3	1.1	1.2

関があることを明らかにしている。

そこで本材料について、疲労試験に使った各試験片形状で非線形(弾塑性)有限要素法を用い、応力集中係数の対比を行った。第4表に応力解析を用いて算定した疲労強度低下率(切欠き係数)の推定を示す。各試験片の応力分布から求めた応力集中係数を、穴直径が3mmで1個の場合と対比した値を示している。穴数が1個の場合に対して、穴が複数ある場合の方が、応力集中係数が1.1倍と大きくなった。一方、疲労試験で得られた切欠き係数も穴が1個の場合に比べて、複数になると1.2倍程度になり、解析の結果とほぼ同一の傾向を示している。これによってマグネシウム合金でも、応力解析の結果から疲労限度の低下率である切欠き係数がほぼ推定できることが分かった。

なお、穴が多い方が強度低下する原因の検討のため、この小穴部分について、表面から裏面までの厚さ方向における応力の分布を調べた。その結果、穴が1個の場合、最大応力は表面からごくわずか中立軸(中心)側に入ったところが最大になっていた。これに対して、穴が複数になると表面層近傍が最大応力となっており、最大応力がより広い場所で発生していることが分かった。この応力分布の相違が強度低下の一つの要因となっていると考えられる。

5 考察

先に第2図で述べた疲労試験中の曲げモーメントが、変形の繰り返し数とともに上昇する理由について検討した。

一般的な、はりのたわみ曲線を式(2)に示す。

$$1/\rho = -M/EI \dots \dots \dots (2)$$

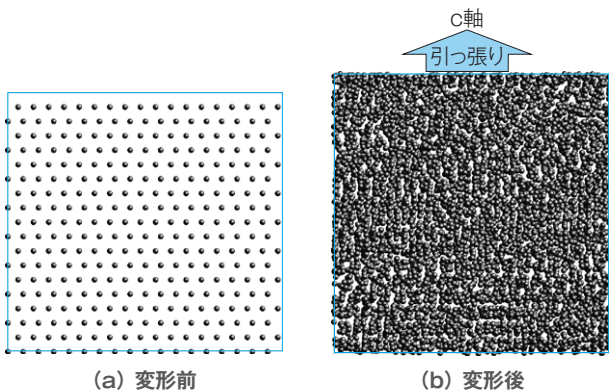
ρ ：はりの中立軸における曲率半径， M ：曲げモーメント， E ：縦弾性係数， I ：断面2次モーメント
この式から、本試験機では変位一定のため、 ρ が一定である。このため、右辺の分母が変化すると考えられるが、断面係数 I は試験片の寸法であるため、疲労き裂が発生するまでは一定と考えられる。

そこで、縦弾性係数 E の変化について、分子動力学計算での推定を試みた。分子動力学計算には富士通(株)製の計算化学ソフトウェア SCIGRESS ME (2.1) を用い、第4図に示すように、六方最密充填構造のマグネシウムの原子構造を縦18個、横18個、奥行き18個の合計5832個の原子でモデル化した。

繰り返し荷重は、モデルの無応力初期構造のc軸方向に強制変位を三角波状に繰り返す方法とした。この変位の速度については、実際の疲労試験の速度は秒単位の現象であるが、分子動力学計算の計算量は膨大となるため、材料の雰囲気温度を高めにするこ

とで、実時間を短く再現できるように工夫している。

第5図に分子動力学計算による強制変位を繰り返



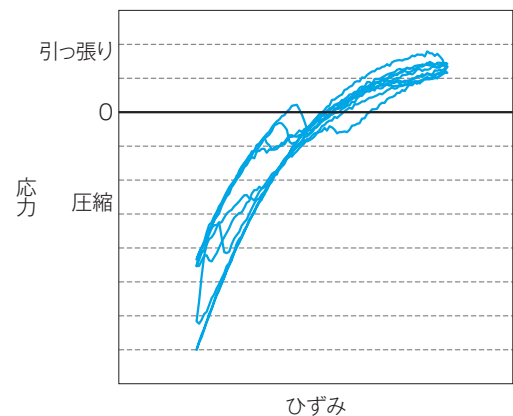
第4図 疲労試験中の曲げモーメント変化に対する考察(分子動力学計算)

(a)は疲労試験を開始する前の無応力の原子配置を示す。(b)は数回の繰り返し変形を与えた場合の原子配置を示す。配列が乱れており複雑な様相となっている。

返した場合の応力とひずみの関係を示す。引っ張り側の縦弾性係数は理論値と一致しているが、圧縮側で曲線の傾きが大きくなる傾向が得られている。このことは、見かけ上は縦弾性係数が圧縮側で上昇していることが示唆されている。

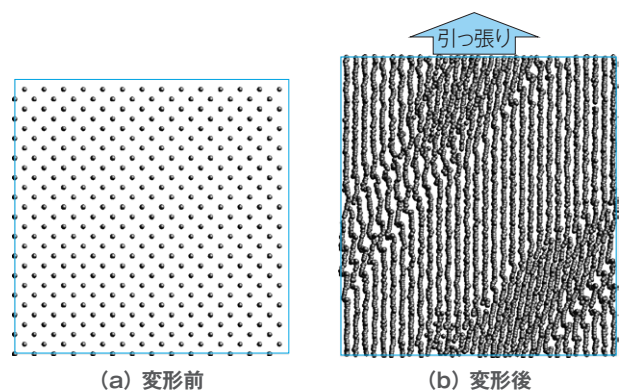
本試験は曲げ試験であるため、表面(及び裏面)が引っ張りと圧縮の応力を交互に受けており、圧縮側での縦弾性係数の上昇で、曲げモーメントの全幅(平均値)が上昇していると思われる。

また比較のため、鉄の原子で同様の検討を行ったところ、第6図に示すようにせん断応力方向に転



第5図 分子動力学計算による強制変位を繰り返した場合の応力とひずみの関係

第4図に示した分子の変形状態をひずみと変形させたときの内部応力の関係から、応力とひずみのヒステリシスループを求めた。引っ張り応力側と圧縮応力側で非対称となっており、圧縮応力側での傾き(弾性係数)が大きいことが分かる。なお現状では解析の範囲に限られるため、定量的な比較は今後の課題である。



第6図 疲労試験中の曲げモーメント変化に対する考察(鉄を用いて分子動力学計算をした場合)

比較のため鉄の場合の結果を示す。せん断方向(変形軸に対して45°傾く)に転位の発生が認められており、塑性変形の様相が再現できている。

位が発生していることが認められた。この変形挙動は先のマグネシウムと異なり、比較的単純な様相を示している。鉄の結晶構造は体心立方構造であり、結晶構造の相違によって塑性後の変形挙動が異なると考えられる。

なお今回の計算では、1個の結晶の中心部を再現しているため、材料表面や粒界の影響は考慮していない。疲労き裂の発生 の推定及び劣化診断を可能にするため、更なる大規模・高速計算に取り組む計画である。

6 むすび

地球環境に優しく、経済的な製品の創出のため、比強度が高いマグネシウム合金の疲労特性を実験的に解明し、疲労強度の低下率を有限要素法によって推定できるようにした。

今後も、材料特性の解明を実験と最新の解析技術を駆使して明らかにし、製品・技術を通じて社会に貢献していく所存である。

最後に、明星大学 総合理工学科 機械工学系 山本晴生教授、同大学大学院 理工学研究科 機械工学専

攻 修士課程 小金正人様には実験を担当していただいた上に、貴重なご助言・ご指導をいただき、ここに感謝の意を表する次第である。

・本論文に記載されている会社名・製品名などは、それぞれの会社の商標又は登録商標である。

《参考文献》

- (1) 小金・山本・渡辺：「断面係数一定のマグネシウム合金AZ31の孔数が異なる時の疲労特性」, 日本材料学会 第63期通常総会・学術講演会 学術講演会講演論文集, 2014
- (2) 軽金属協会編, アルミニウムハンドブック
- (3) 山本・渡辺：「弾塑性応力解析による切欠き係数の推定」, 日本機械学会 山梨講演会講演論文集, pp.147-148, 2003
- (4) 渡辺・山本：「弾塑性応力解析による切欠き係数の推定：S35丸棒の環状V溝の場合」, 日本機械学会 山梨講演会講演論文集, pp.161-162, 2004
- (5) 渡辺・山本：「有限要素法による鉛フリーはんだの寿命解析」, 日本材料学会 学術講演会講演論文集56, pp.123-124, 2007

《執筆者紹介》



渡辺 広光
Hiromitsu Watanabe

基盤技術研究所
解析シミュレーション技術及び材料強度評価技術の研究に従事