

岐阜大学工学部 正 ○戸 梶 恵 郎
正 小 川 武 史
下 建 春

1 緒 言

Al-Li合金は 高比強度および高弾性の性質を有するので、次世代航空機材料として期待されている。しかし、これまでその疲労特性に関して十分なデータが蓄積されているとは言えなかった。そこで、著者らは2種類のAl-Li合金のピーク時効材の疲労強度⁽¹⁾、疲労強度に及ぼす時効条件の影響⁽²⁾および腐食疲労特性⁽³⁾などについて、2024-T4および7075-T651（以後、従来合金）との比較のもとに検討を行ってきた。その結果、Al-Li合金のピーク時効材は 従来合金よりも優れた疲労特性を示すことがわかった。しかし、過去Al-Li合金は高い切欠き感受性のために実用化されなかった経緯がある。したがって、疲労における切欠き感度の評価は実用的にきわめて重要である。

そこで、本研究では、2種類のAl-Li合金2090および8090のピーク時効材の環状切欠き試験片を用いて回転曲げ疲労試験を行い、その切欠き感受性について従来合金と比較、検討した。

2 材料および実験方法

用いた材料は AA規格のAl-Li合金2090および8090相当材であるが、これまでの研究⁽¹⁾⁻⁽³⁾で用いた素材とは異なるものである。比較材として、市販の2024-T4および7075-T651を用いた。化学成分をそれぞれ表1および表2に示す。Al-Li合金には納入後、大気中793 K・30分保持後水冷の溶体化処理を行い、続いて室温に一日放置後448Kで、2090合金には80時間、8090合金には150時間のピーク時効処理を施した。各合金の機械的性質を表3に示す。

疲労試験片は、最小断面部直径8mmで切欠き半径 ρ を変えて得られた応力集中係数 K_t が1.38、1.78および2.73の3種類の環状切欠き試験片である。

表1 Al-Li合金の化学成分(wt.%)

Alloy	Si	Fe	Cu	Mg	Li	Zr	Ca	K	Na
2090	0.026	0.03	2.65	—	2.25	0.11	<0.0005	<0.0003	<0.0003
8090	0.037	0.03	1.25	0.87	2.55	0.11	<0.0005	<0.0003	<0.0003

表2 従来合金の化学成分(wt.%)

Alloy	Si	Fe	Cu	Mg	Mn	Cr	Zn	Ti
2024	0.13	0.24	4.57	1.65	0.63	0.01	0.09	0.02
7075	0.14	0.27	1.70	2.60	0.04	0.18	5.70	0.02

用いた試験機は容量98N・mの小野式回転曲げ疲労試験機で、室温大気中、繰返し速度約60Hzで実験を行った。疲労限度を繰返し数 10^7 回の時間強度とし、応力レベルの刻みを10MPaとして決定した。 10^7 回の繰返し後破断に至らなかった試験片については、切欠き底を光学顕微鏡で詳細に観察し、停留き裂の認められた場合には、さらに試験片を軸方向に4分割し、停留き裂の内部方向の様相を観察した。

3 実験結果

3・1 疲労強度 各合金のS-N曲線を図1に示す。基準となる平滑材の疲労限度 σ_{w0} は2090合金で160MPa、8090合金で150MPa、2024合金で90MPa、7075合金で130MPaであり、Al-Li合金の疲労強度は従来合金よりも優れている。これは前報の結果⁽¹⁾と同様である。一方、切欠き材の疲労強度は同一の切欠き形状に対して8090合金が最も高く、次いで2090合金、7075合金、2024合金の順であり、静的強度とは対応していない。すなわち、静的強度が高いからといって、切欠きに敏感であるという訳ではない。図から明かなように、8090合金では切欠き材の疲労強度は平滑材よりもわずかに低下する程度であり、切欠きの鋭さにはほとんど依存しない。それに対して、2090合金および従来合金では切欠きが鋭くなるに伴って疲労強度も低下する。

以上のように、Al-Li合金は 従来合金に比べて優れた切欠き疲労強度を示すが、同じAl-Li合金でも切欠き感受性は異なるようである。

切欠き材の疲労試験から得られた結果を表4に示す。表において、 σ_{v1} はき裂発生に対する疲労限度、 σ_{v2} は破断に対する疲労限度、 K_{t1} および K_{t2} はそれぞれの疲労限度に対する切欠き係数である。後述するように、2090合金の $K_{t1}=2.73$ の試験片、および8090合金のすべての試験片において停留き裂が観察されたので、疲労限度は σ_{v1} と σ_{v2} に分けられるが、従来合金では

表3 機械的性質

Alloy	Proof stress $\sigma_{0.2}$ MPa	Tensile strength σ_B MPa	Elongation ϕ %	Reduction of area ψ %	Young's modulus E GPa	Vickers hardness H_v
2090	439	528	2	7	73.1	151
8090	509	576	1	5	72.3	158
2024	419	551	11	13	72.1	130
7075	610	659	6	11	70.3	167

停留き裂が観察されなかったもので、得られた疲労限度は σ_{w1} を意味する。なお、2090合金の σ_{w1} は材料の都合で決定できなかったが、停留き裂は小さかったので、 σ_{w1} は σ_{w2} の直下にあると思われる。

3・2 巨視的破壊様相 8090合金の巨視的破壊様相は、応力の高低および切欠き形状にかかわらず明りようなせん断形破壊が支配的であった。これに対して、2090合金および従来合金では、一部のせん断形破壊を除いて垂直形の破壊であった。なお、Al-Li合金の平滑材では、前報の結果⁽¹⁾⁻⁽³⁾と同様に例外なくせん断

表4 疲労試験結果

Alloy	ρ (mm)	K_t	σ_{w1} (MPa)	σ_{w2} (MPa)	σ_{w1}/σ_{w0}	σ_{w2}/σ_{w0}	K_{f1}	K_{f2}
2090	∞	1.00	160	-	1.000	-	1.000	-
	2.50	1.38	130	-	0.813	-	1.231	-
	1.00	1.78	100	-	0.625	-	1.600	-
	0.30	2.73	-	80	-	0.500	-	2.000
8090	∞	1.00	150	-	1.000	-	1.000	-
	2.50	1.38	120	150	0.800	1.000	1.250	1.000
	1.00	1.78	110	130	0.733	0.867	1.364	1.154
	0.30	2.73	70	130	0.467	0.867	2.143	1.154
2024	∞	1.00	90	-	1.000	-	1.000	-
	2.50	1.38	80	-	0.889	-	1.125	-
	1.00	1.78	60	-	0.667	-	1.500	-
	0.30	2.73	30	-	0.333	-	3.000	-
7075	∞	1.00	130	-	1.000	-	1.000	-
	2.50	1.38	80	-	0.615	-	1.625	-
	1.00	1.78	60	-	0.462	-	2.167	-
	0.30	2.73	50	-	0.385	-	2.600	-

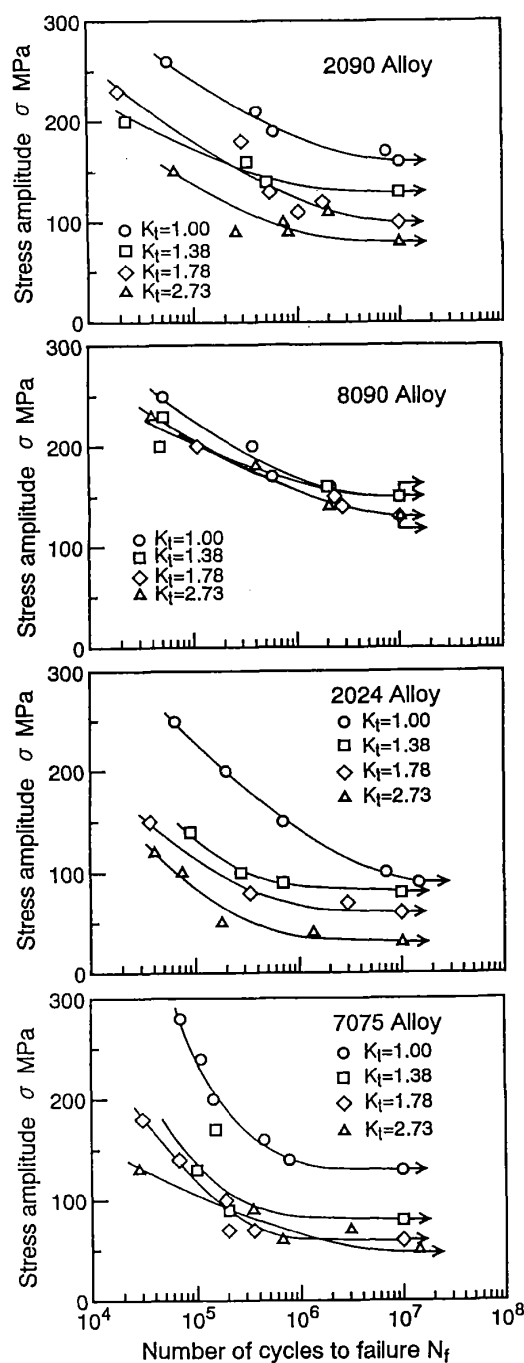


図1 S-N線図

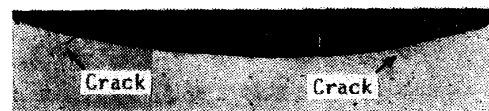
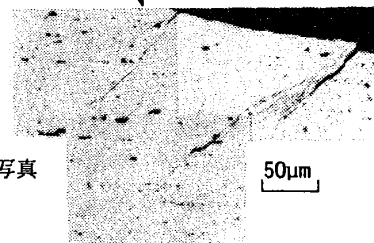
(a) $K_t=1.38$, $\sigma=150\text{MPa}$ (b) $K_t=1.78$, $\sigma=130\text{MPa}$ (c) $K_t=2.73$, $\sigma=130\text{MPa}$

図2 8090合金で観察された停留き裂の様相

形破壊であった。

3・3 停留き裂の観察 従来合金ではすべての切欠き形状において停留き裂は観察されなかった。しかし、2090合金の $K_t=2.73$ の試験片、および8090合金のすべての切欠き試験片において停留き裂が観察された。8090合金において観察された停留き裂の例を図2に示す。図から明らかなように、切欠き形状にかかわらず、停留き裂はせん断形であり、荷重軸に垂直な面に対し

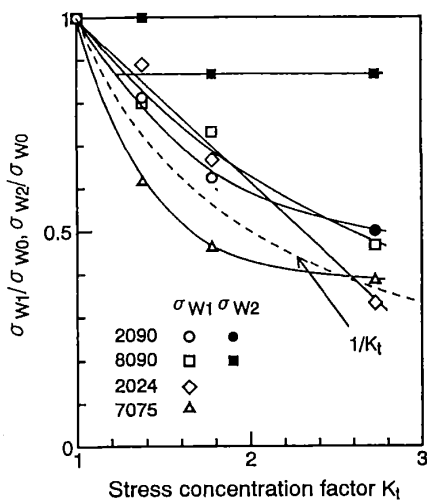


図3 疲労限度と応力集中係数の関係

て約50~65°傾いた方向に生じている。これは2090合金においても同様であった。また、複数の停留き裂やき裂の分岐・屈曲が認められる傾向にある。

4 考 察

図3に σ_{w1}/σ_{w0} および σ_{w2}/σ_{w0} と K_t の関係を示す。Al-Li合金の σ_{w1}/σ_{w0} は $1/K_t$ よりも上方にあり、 K_t の小さい範囲では2024合金とほぼ一致するが、 K_t の大きい場合 2024合金より大きく、Al-Li合金のき裂発生に対する切欠き感度は、切欠きが鋭くなるに従って2024合金よりも低くなるようである。一方、7075合金の σ_{w1}/σ_{w0} は $1/K_t$ よりも下方にあり、切欠き感受性は他の合金に比べて高い。8090合金では停留き裂が存在したから、 σ_{w2}/σ_{w0} は $1/K_t$ よりも大きく上方に位置することになり、また K_t に依存しない。分岐点の切欠き半径 ρ_0 は2.5mm以上であり、従来合金の0.1~0.4mm⁽⁴⁾と比べると著しく大きい。 σ_{w2} はき裂進展限界応力であるから、8090合金は他の合金に比べてき裂進展抵抗が高いことになる。事実、すでに著者らは、8090合金のき裂進展抵抗が2090合金や従来合金よりも優れていることを前報⁽¹⁾で明らかにしている。図2に示したように、発生したき裂はせん断形であり、き裂の進展に伴いき裂先端が最小断面部から離れていくこと、複数のき裂が生じること、またき裂の分岐を生じ易いことなどに起因してき裂が停留し易いものと思われる。前述したように、2090合金の最も鋭い切欠きにおいて停留き裂が観察されたが、破断に対する切欠き感度は8090合金よりも明らかに高い。

図4に K_{t1} および K_{t2} と K_t の関係を示す。本研究のAl-Li合金の結果を 広範囲のAl合金と比較するために、文献から引用した15種類のAl合金の結果⁽⁵⁾を、

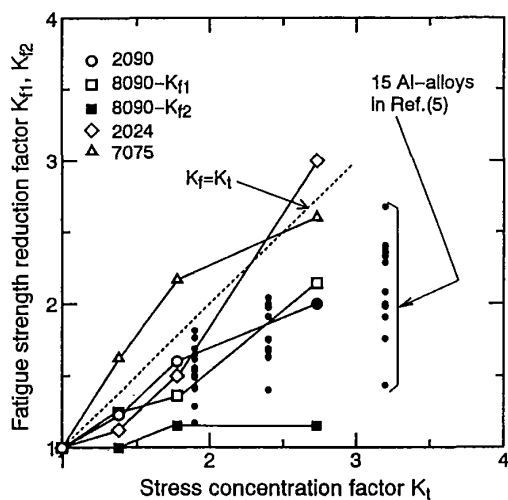


図4 切欠き係数と応力集中係数の関係

個々の結果を区別することなく図中に併記した。ただし、これらの結果は破断に対する疲労限度であり、 σ_{w1} と σ_{w2} は区別されていない。したがって、破断に対する疲労限度の切欠き感度を比較する。本研究における従来合金の切欠き感度は15種類のAl合金よりも高く、ほぼ $K_{t1} = K_t$ であるが、2090合金は本研究の従来合金より切欠き感度が低く、15種類のAl合金の結果のほぼ平均的な感度を示している。一方、8090合金の結果は、本研究の従来合金や15種類のAl合金の結果より明らかに下方にあり、きわめて低い切欠き感度を示す。

5 ま と め

2種類のAl-Li合金2090および8090の環状切欠き材について 回転曲げ疲労試験を実施し、従来合金2024-T4および7075-T651との比較のもとにAl-Li合金の切欠き感受性について検討した。き裂発生に対する Al-Li合金の切欠き感度は従来合金よりもやや鈍感である。また、8090合金では高いき裂進展抵抗のために停留き裂が存在し、破断に対する切欠き感度はきわめて鈍感であった。以上の結果から、Al-Li合金は 切欠き疲労特性においても、従来合金より優れていると結論される。

参 考 文 献

- (1) 戸梶恵郎, 小川武史, 加藤容三, 材料, 39-439, 400(1990).
- (2) 戸梶恵郎, 小川武史, 藤村 一, 材料, 40-451, 444(1991).
- (3) 戸梶恵郎, 小川武史, 材料, 42-475, 掲載予定.
- (4) 西谷弘信, 皮籠石紀雄, 日本機械学会論文集, 51-462, 530(1985).
- (5) 竹内勝治, 軽金属溶接, 25-8, 366(1987).