高湿度下における時効硬化 Al 合金押出し材の疲労強度* (回転曲げ疲労と超音波疲労)

皮籠石 紀雄^{*1}, 福留 拓朗^{*2}, 仮屋 孝二^{*3}
陳 強^{*4}, 後藤 真宏^{*5}

Fatigue Strength of Age-Hardened & Extruded Al Alloy under High Humidity (Rotating Bending and Ultrasonic Loading)

Norio KAWAGOISHI^{*6}, Takuro FUKUDOME, Kohji KARIYA,
Qiang CHEN and Masahiro GOTO

^{*6} Department of Mechanical Engineering, Kagoshima University,
1-21-40 Korimoto, Kagoshima-shi, Kagoshima, 890-0065 Japan

In order to investigate the availability of ultrasonic fatigue test for the evaluation of fatigue properties under conventional loading frequency, fatigue tests under ultrasonic frequency and rotating bending were carried out using plain specimens of an age-hardened and extruded Al alloy 7075-T6 in 7 kinds of environments of controlled humidity of 25, 50, 70 and 85%, distilled water oxygen gas and nitrogen gas. Although fatigue strength was decreased by high humidity, the decrease by high humidity was very small when the humidity was lower than about 60%~70% and fatigue strength was largely decreased above that humidity under both tests. However, the main reason for the decrease in fatigue strength by high humidity was different between rotating bending fatigue and ultrasonic fatigue. That is, the decrease in fatigue strength was mainly the acceleration of crack growth caused by brittle fracture under rotating bending and the transition to shear mode crack accompanied with glide plane decohesion and void formation under ultrasonic loading, respectively.

Key Words: Fatigue, Extruded 7075-T6, Humidity, Ultrasonic Loading, Rotating Bending, Crack Initiation, Crack Growth Mode, Fracture Mechanism

1. 結 言

環境負荷低減が緊急の課題である現状では、機器の軽量化やリサイクル化を図ることに加え、長期間使用することも重要である。その際、機器の長期安全性を確保する上で、長寿命域の疲労特性の把握は必須の条件である。このような背景から、これまでに高強度材を中心に各種材料の長寿命域における疲労特性に関する研究は数多く行われてきた^{(1)~(4)}。ところが、長寿命域の疲労特性を、通常行われる数十 Hz 程度の繰返し速度の疲労試験で調べるとすれば長時間が必要である。これに対し、超音波疲労試験は試験時間を大幅に

短縮できる^{(5)~(8)}。しかし超音波と通常の繰返し速度の両試験間での疲労特性の関係については十分明らかにされたとは言い難い。

著者らはこれまで、比強度が高くリサイクル性に優れている時効硬化 Al 合金の疲労特性に及ぼす繰返し速度の影響を調べるため、大気中で超音波疲労試験と回転曲げ疲労試験を実施し、疲労過程における試験片表面の連続観察と破断後の破面観察を行った。その結果、両試験間で疲労強度だけでなく破壊機構も異なり、超音波疲労による結果を通常の試験での評価に適用できないことがあることを明らかにした^{(9)~(12)}。

一方、超音波疲労試験は繰返し速度が大きいいため環境の影響、例えば時間依存形損傷である腐食が問題となるような環境の場合、通常の繰返し速度下の試験とは異なる影響があるものと考えられる。すなわち、腐食環境下の疲労特性評価における繰返し速度の影響は、長時間を要する腐食疲労特性の評価に超音波疲労試験を加速試験として適用する際は別な問題が推測される。

* 原稿受付 2010 年 6 月 28 日。

^{*1} 正員, 鹿児島大学大学院理工学研究科(☎ 890-0065 鹿児島市郡元 1-21-40)。

^{*2} 正員, UD トラックス(株)(☎ 362-8523 上尾市大字 1-1)。

^{*3} 正員, 第一工業大学(☎ 899-4395 霧島市国分中央 1-10-2)。

^{*4} 正員, 高知工業高等専門学校機械工学科(☎ 783-8508 南国市物部乙 200-1)。

^{*5} 正員, 大分大学工学部(☎ 870-1192 大分市旦野原 700)。

E-mail: hiro@mech.kagoshima-u.ac.jp

このことを検討するため、著者らは先ず、超音波疲労強度に及ぼす大気湿度の影響を調べ、高繰返し速度に起因した超音波疲労特有と考えられるき裂伝ばに及ぼす湿度依存性を明らかにした。⁽¹³⁾今回は湿度を変えた環境下で回転曲げ疲労試験を行い、その結果と前報における超音波疲労の結果に、新たな結果を加えそれらを比較し、通常の繰返し速度下と超音波疲労下での疲労強度に及ぼす湿度の影響の相違について検討した。

なお本研究は、通常の繰返し速度下での疲労特性評価に超音波疲労試験の結果を適用する際の問題を検討する一連の研究の一部である。従って、腐食環境下での疲労強度に及ぼす繰返し速度の影響の検討を目的としたものではない。

2. 材料試験片および実験方法

用いた材料は、市販の時効硬化 Al 合金 7075-T6 押出し材（直径 22mm の丸棒）である。その化学成分を表 1 に示す。素材は、T6 の条件により時効処理された状態で納入されたものであり、平均結晶粒径は約 8 μ m である。また素材は強度の押出加工を受けたことにより、その断面が (111) 面となる顕著な集合組織を有している⁽¹²⁾。表 2 に素材の機械的性質を示す。

緒言で述べたように、本研究では、通常の繰返し速度である回転曲げ疲労の結果を、先に報告した超音波疲労試験の結果と比較することにより、高湿度環境下における疲労特性に及ぼす繰返し速度の影響を検討する。従って、超音波疲労試験の方法については要点のみ簡単に記述し、その詳細については前報⁽¹³⁾を参照願いたい。

図 1 に、各試験に用いた試験片の形状、寸法を示す。試験片表面は、エメリーペーパーによる研磨の後、電解研磨で約 20 μ m 除去し最終仕上げとした。表面のき裂長さ l は、レプリカ法を用いて測定し、試験片表面に沿

う円周方向長さとして定義した。用いた試験機は小野式回転曲げ疲労試験機（繰返し速度 50Hz）と超音波疲労試験機（繰返し速度 19.5kHz）であり、応力比はいずれの試験でも $R=-1$ である。試験環境は、窒素ガス (N_2 ; 99.995%以上, O_2 ; 5ppm 以下, H_2O ; 10ppm 以下) 中、酸素ガス (O_2 : 99.5%以上, N_2 : 0.5%以下) 中、相対湿度を 25, 50, 70, 85% に制御した環境中および蒸留水中の 7 種類である。湿度の制御は、除湿器、シリカゲルおよび加湿器を用いて行い、その際の精度は回転曲げ疲労の場合 $RH \pm 5\%$ 、超音波疲労の場合 $RH \pm 3\%$ であった (RH : 相対湿度)。また気体中の温度はすべて室温 (25 $^{\circ}C \sim 30^{\circ}C$) であり、蒸留水中の場合 $30 \pm 3^{\circ}C$ とした。なお、蒸留水中の試験は毎分 250cc の水を試験片表面に滴下する方式で行った。

(a) Rotating bending fatigue test

(b) Ultrasonic fatigue test

Fig.1 Shape and dimensions of specimens

3. 実験結果及び考察

3.1 疲労強度に及ぼす大気湿度の影響 図 2 は、回転曲げ疲労に対し、各種環境中で求めた平滑材の $S-N$ 曲線である。同図には超音波疲労の結果⁽¹³⁾も破線で示してある。超音波疲労の場合と同様に回転曲げ疲労でも、疲労強度は窒素ガス中が最も高く、高湿度になると大幅に低下するが、その傾向は湿度の増加に伴う単調低下ではなく、疲労強度に対する湿度の影響が三つの環境グループに分けられる。

図 3 は、疲労強度の環境依存性をみるため、回転曲げ疲労と超音波疲労の場合の各環境下における 10^7 回での時間強度を比較したもので、図 2 の結果の傾向をわかりやすく整理し直したものである。いずれの試験でも湿度上昇による疲労強度の低下傾向は湿度 60%~70% 程度を境に大きく変化している。すなわち、湿度

Table 1 Chemical composition (wt%)

Si	Cu	Fe	Mn	Mg	Cr	Zn	Zr+Ti	Ti
0.09	1.47	0.25	0.03	2.56	0.19	5.46	0.03	0.03

Table 2 Mechanical properties

	E (GPa)	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	σ_B (MPa)	σ_T (MPa)	ϕ (%)
Al7075-T6	72.0	630	691	764	9.5

E : Young's modulus, $\sigma_{0.2}$: 0.2% proof stress

σ_B : Tensile strength, σ_T : True breaking stress

ϕ : Reduction of area

Fig.2 S-N curves of plain specimens under rotating bending

Fig.3 Environmental dependence of fatigue strength at 10^7 cycles

が60%~70%程度より低い場合疲労強度の低下は非常に小さく、それを越えると急に低下するが、湿度70%付近を越えると再び強度低下の程度は小さくなる。そして、高湿度による疲労強度の低下を、湿度25%と85%中の 10^7 回の時間強度で比較した場合、回転曲げ疲労では約70%に、超音波疲労では約45%に低下し、低下の割合は超音波疲労の方が大きい。このことは腐食の観点で考えた場合、試験時間の長い回転曲げ疲労の方が強度低下は大きいと考えられ逆の傾向である（本実験法では、 10^7 回の場合、回転曲げ疲労では約55h、超音波疲労では約50minである）。このことについては後で検討する。

以上のような疲労強度に及ぼす湿度の影響が、ある値を境に大きく変化するという傾向は、Al合金や鉄鋼材料の通常の繰返し速度下でも報告されている。⁽¹⁴⁾ このように、通常の繰返し速度である回転曲げ疲労だけでなく、繰返し速度が大きく異なる超音波疲労においても疲労強度の低下が60%~70%付近の湿度を境に大きく異なるということは注目すべきことであり、し

かもこの程度の湿度の変動は日常的に起こるので、実用上考慮しておく必要がある。

以下では、疲労強度に及ぼす湿度の影響が、回転曲げ疲労と超音波疲労の間で異なる理由を、両試験におけるき裂の発生と伝ばさらに破壊機構を通して検討する。

3.2 疲労き裂の発生と伝ばに及ぼす大気湿度の影響

図4は、疲労強度に対する湿度の影響が小さい湿度25%中とそれが大きい85%中での回転曲げ疲労におけるき裂伝ば曲線である。湿度25%中に対し、湿度85%中の場合のき裂は早期に発生し、伝ば速度も速い。このことは超音波疲労でも同様であった。⁽¹³⁾

Fig.4 Crack growth curves under rotating bending
(in RH 25% and RH85%, $\sigma_a = 260$ MPa)

図5は、回転曲げ疲労と超音波疲労下で観察した応力繰返しに伴う試験片表面状態の変化を示すレプリカ写真である。図中の矢印↑はき裂先端を示している。き裂は、回転曲げ疲労と超音波疲労共に、湿度25%中だけでなく湿度85%中でも電解研磨時にマトリックスと析出物界面の溶解で生じたと考えられる粒内のピットから発生する場合がほとんどであったが、粒内すべりから発生する場合も一部認められた。そしていずれの試験でも、また湿度でも、き裂が短い間は組織の影響によりせん断形で伝ばするが、き裂が長くなると巨視的には、回転曲げ疲労の場合両湿度とも試験片軸に対し直角方向に引張形で伝ばする（湿度85%の場合せん断形伝ばの傾向もみられるが、巨視的には引張形である。図5(a-2)および図6(f)参照）。しかし、超音波疲労の場合、湿度25%中では、発生したき裂は引張形で伝ばした後、せん断方向に伝ば方向を変えている（図5(b-1)および図7(a)参照）。そして、湿度85%中では

Fig.5 Change in surface state of plain specimen due to stress repetitions ($\Rightarrow$ crack tip)

Fig.6 Morphologies of cracks in plain specimens under rotating bending

Fig.7 Morphologies of cracks in plain specimens under ultrasonic loading

Fig.8 Fracture surfaces under rotating bending (tensile mode)

Fig.9 Fracture surfaces in nitrogen gas (shear mode)

引張形伝ばはほとんど確認できない (図 5(b-2)および図 7(c) 参照)。

図 6 は、各環境下で破壊した回転曲げ疲労の場合の試験片で観察したき裂の巨視的形態を示す写真である (図中の矢印は破壊の起点を示している)。また図 7 は比較を容易にするため、先に報告した超音波疲労の代表的な条件での結果⁽¹³⁾も引用した。超音波疲労の場合、これまでの報告で明らかにしたように、き裂は環境に関係なくせん断形伝ばを経て破壊する^{(9)~(13)}のに対し、回転曲げ疲労の場合、窒素ガス中ではせん断形となるが、その他の湿度環境中ではすべて引張形

である (酸素ガス中ではわずかにせん断形伝ばも生じる⁽¹²⁾)。そして、せん断形で伝ばしたすべての場合のき裂伝ば方向は、試験片軸に対し 35° 前後の傾きでほぼ一定である。このようなせん断形き裂の伝ば方向が応力や環境に関係なくほぼ一定となるのは、本材が顕著な集合組織を有しているためである⁽¹²⁾。

図 8 は、回転曲げ疲労において引張形破壊となった湿度 25%中、85%中および蒸留水中で破壊した試験片の破面写真である。すべての破面でストライエーションが観察されたが、湿度 85%中と蒸留水中ではこれまでも多くの研究で報告されているように^{(14)~(16)}

脆性破面とアノード溶解を示唆する腐食粉も含まれていた。そして脆性破面の割合は蒸留水中の方が大きい。

図 9 は、せん断形破壊となった回転曲げ疲労の窒素ガス中と超音波疲労の窒素ガス中での破面写真である。いずれの試験でもすべり破面と規則的に並んだボイドが観察され、せん断形破面の特徴には両試験間の相違はみられない。

3・3 考察 以上述べたように、超音波疲労の場合のき裂伝ばは、引張形とせん断形があり、特に高湿度中と蒸留水中ではき裂伝ばのすべてがせん断形であった。これに対し、回転曲げ疲労の場合、窒素ガス中でのみせん断形が生じ、その他の湿度環境中ではすべて引張形であった。これらのことを、回転曲げ疲労と超音波疲労におけるき裂伝ばモードの湿度依存性として模式的に示すと図 10 のようになる。なお、き裂伝ばモードが引張形からせん断形に遷移する時の破面率の湿度依存性の詳細は明らかでないで、図の縦軸のスケールは示していない。すなわち、引張形あるいはせん

断形が 0% と 100% 以外の領域は両モードが混在していることを示している。

図 11 は、図 3 に示した疲労強度の湿度依存性を、図 10 のき裂伝ば機構と関連させて疲労寿命の湿度依存性として示したものである。回転曲げ疲労と超音波疲労のいずれも高湿度により疲労強度は低下するが、その理由は両試験で異なる。すなわち、き裂発生に対する湿度の影響は、腐食環境に曝される時間が長い回転曲げ疲労の方が大きいと考えられる反面、超音波疲労の場合流動応力の上昇で環境感度は上昇することも考えられるなど複雑である。しかし、回転曲げ疲労と超音波疲労のいずれにおいても、疲労寿命の多くはき裂伝ば過程で占められる(図 4 と文献(13)参照)。このことは高湿度中で特に顕著である。従って、両試験間における高湿度による疲労強度低下の相違は主としてき裂伝ば過程にあることになる。そして高湿度下でのき裂伝ば過程では、回転曲げ疲労では脆性割れの発生と腐食溶解が、超音波疲労ではせん断形き裂の伝ばへの変化が生じ、これらの破壊機構の変化が疲労強度低下を招く。もし回転曲げ疲労におけるき裂伝ばのすべてで脆性割れが生じるなら、超音波疲労における塑性変形を伴うせん断形破壊より強度低下は大きくなるはずだが、図 8 に示したように、高湿度下であっても破面の多くはストライエーションで占められ、その中に脆性割れが混在しているため、結果として脆性割れによる加速は小さい。このことは、湿度 85% 中に比べ脆性割れの多い蒸留水中の方が疲労強度の低下が大きいことからわかる。また、上述したき裂伝ばに及ぼす破壊機構の相違は、高湿度による疲労強度低下の程度が超音波疲労と回転曲げ疲労で異なる理由の一つでもある(曲げ荷重と軸荷重間で生じる応力勾配の相違による疲労強度への影響は主としてき裂発生過程で大きい、本材のき裂は点発生的に生じることから、⁽¹⁷⁾ その影響は小さいものと考えられる。)

ところで、窒素ガス中では超音波疲労と同様に回転曲げ疲労でもせん断形破壊した。これは前報で明らかにしたように、不活性ガスである窒素ガス中では超音波疲労におけるき裂伝ば過程と同様の環境になる(超音波疲労におけるき裂伝ばは高速のため、き裂先端への水分や空気等の試験環境の影響が及びにくい)ためである。⁽¹³⁾ このようにき裂伝ば速度が高速になる程環境の影響が減少することは、破壊機構が変化する今回の材料に限らず、他の金属材料でも同様に生じると考えるべきであり、超音波疲労における特徴であると考えられる。換言すれば、表面起点型破壊においては、程度の差はあれ、超音波荷重下での疲労強度は通常の

Fig.10 Schematic illustration of effect of humidity on crack growth mode

Fig.11 Schematic illustration of effect of humidity on fatigue strength

繰返し速度下でのそれと異なることを意味している。

以上本研究では、緒言で述べたように、超音波疲労試験を長寿命域における疲労特性評価の加速試験として適用する場合の問題点に着目して検討した。しかし腐食疲労の場合、超音波疲労という高速下に限らず、たとえば数+Hz よりさらに遅い繰返し速度での影響も大きいので、⁽¹⁸⁾集合組織を持つ材料における疲労特性に及ぼす繰返し速度の影響については現在検討中である。

4. 結 論

時効硬化 Al 合金 7075-T6 押出し材の超音波疲労と通常の繰返し速度である回転曲げ疲労の間における疲労特性に及ぼす湿度の影響の相違を調べるため、窒素ガス中、酸素ガス中、相対湿度を 25, 50, 70, 85% に制御した環境中および蒸留水中で回転曲げ疲労試験を行い、先に報告した超音波疲労試験の結果と比較した。得られた主な結論は以下の通りである。

(1) 回転曲げ疲労と超音波疲労のいずれでも、疲労強度は高湿度により大きく低下した。低下の程度を、湿度 25% と 85% 中の 10^7 回における時間強度の割合で比較すると、回転曲げ疲労で約 70%, 超音波疲労で約 45% と超音波疲労の方が低下量は大きい。

(2) 回転曲げ疲労と超音波疲労のいずれでも、疲労強度に及ぼす湿度の影響は、湿度が 60%~70% 程度を境に大きく変化し、それ以下およびそれ以上での変化は小さい。

(3) 回転曲げ疲労と超音波疲労のいずれでも、高湿度により、き裂発生は促進されるとともにき裂伝ば速度も大きくなる。

(4) 回転曲げ疲労における巨視的き裂伝ば形態は、窒素ガス中では引張形からせん断形に変化するのに対し、その他の湿度環境中ではすべて引張形である。すなわち、巨視的き裂伝ば形態に及ぼす湿度の影響は、すべての環境下でせん断形伝ばが生じる超音波疲労とは異なる。

(5) 回転曲げ疲労における破面には、窒素ガス中ではすべり破面とボイド、低湿度中ではストライエーション、そして高湿度中と蒸留水中ではストライエーションに加え脆性割れが観察された。従って、回転曲げ疲労において高湿度中の疲労強度が低下した理由は、脆性割れによるき裂伝ばの加速が一因であり、すべり破壊への遷移が主な加速要因である超音波疲労とは異なる。このことが、回転曲げ疲労と超音波疲労の間で、高湿度による疲労強度低下の程度が異なった主な理由である。

(6) 以上の結論から、通常の繰返し速度下での疲労特性評価の加速試験として、超音波疲労試験を適用する場合は注意を要するといえる。

文 献

- (1) Shiozawa, K., Lu, L. and Ishihara, S., Subsurface Fatigue Crack Initiation Behavior and S-N Curve Characteristics in High Carbon-Chromium Bearing Steel, *Journal of the Society of Materials Science, Japan*, Vol.48, No.10 (1999), pp.1095-1100.
- (2) Murakami, Y., Ueda, T., Nomoto, T. and Murakami, Y., Mechanism of Superlong Fatigue Failure in the Regime of $N > 10^7$ Cycles and Fractography of the Fracture Surface, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A*, Vol.66, No.642(2000), pp.311-319.
- (3) Sakai, T., Takeda, M., Tanaka, N., Kanemitsu, M., Oguma, N. and Shiozawa, K., S-N Property and Fractography of High Carbon Chromium Bearing Steel over Ultra Wide Life Region under Rotating Bending, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A*, Vol.67, No.663(2001), pp.1805-1812.
- (4) Wang, QY., Bathias, C., Kawagoishi, N. and Chen, Q., Effect of Inclusion on Subsurface Crack Initiation and Gigacycle Fatigue Strength, *International Journal of Fatigue*, Vol.24(2002), pp.1269-1274.
- (5) Kikukawa, M., Ohji, K. and Ogura, K., Push-push fatigue strength of mild steel at very high frequencies of stress up to 100 kc/s, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers*, Vol.32, No.235(1966), pp.362-370.
- (6) Awatani, J. and Katagiri, K., Macroscopic study of metals fatigued at ultrasonic frequency, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers*, Vol.34, No.261(1966), pp.833-841.
- (7) Chen, Q., Kawagoishi, N., Nisitani, H., Ohtsubo, K., Wang, QY. and Kondo, E., Ultrasonic Fatigue Properties of Ni-Base Superalloy, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A*, Vol.69, No.679(2003), pp.626-632.
- (8) Kawagoishi, N., Maemura, E., Chen, Q., Goto, M. and Morino, K., Effect of grain size on fatigue properties of Ni-base super alloy Inconel 718, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A*, Vol.74 No.743(2008), pp.1000-1005
- (9) Kawagoishi, N., Chen, Q., Yan, N., Wang, QY. and Kondo, E., Ultrasonic Fatigue Properties of a High Strength Extruded Al Alloy, *Transactions of the Japan Society of*

- Mechanical Engineers, Series A*, Vol.69, No.688(2003), pp.1672-1677.
- (10) Kawagoishi, N., Chen, Q., Yan, N., Wang, QY. and Goto, M., Ultrasonic fatigue properties of an age-hardened Al alloy 6061-T6, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A*, Vol.70, No.696(2004), pp.1139-1145.
- (11) Kawagoishi, N., Oki, M., Goto, M., Chen, Q. and Wang, QY., Crack growth behavior of Al Alloy 7075-T6 under Ultrasonic Fatigue, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A*, Vol.72, No.721(2006), pp.1356-1363.
- (12) Kawagoishi, N., Fukudome, T., Nakamura, Y., Ohzono, Y. and Goto, M., Propagation of Shear Mode Crack in Age-hardened and Extruded Al Alloy under Ultrasonic Loading, to be published in *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A*.
- (13) Fukudome, T., Kawagoishi, N., Yan, N., Ohzono, Y. and Goto, M., Effect of Humidity on Fatigue Strength of Age-hardened Al Alloy under Ultrasonic Loading, to be published in *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A*.
- (14) Haftirman, Hattori, S. and Okada, T., Fatigue Strength of Aluminum Alloys in High-Humidity Environment, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A*, Vol.62, No.597(1996), pp.1140-1145.
- (15) Broom, T. and Nicholson, A., Atmosphere corrosion-fatigue of age-hardened aluminum alloys, *Journal of Institute Metals*, 89(1961), pp.183-190.
- (16) Komai, K., Yamaji, K. and Endo, K., Effect of atmosphere on fatigue crack propagation of aluminum alloy, *Journal of the Society of Materials Science, Japan*, Vol.29, No.317(1980), pp.162-167.
- (17) Nisitani, H., Kawagoishi, N. and Wakahara, M., Comparison of Characteristics of Crack Growth in three Age-Hardened Al Alloys, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A*, Vol.51, No.464(1985), pp.1017-1024.
- (18) Endo, K., Komai, K. and Matsuda, K., Mechanical Effects of Corrosion Products on Corrosion Fatigue Crack Growth in a Steel, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A*, Vol.46, No.412(1980), pp.1337-1343.