Regular Article

191

Comparison of Fatigue Crack Propagation Behavior of Additive Manufactured Zero Thermal Expansion Alloy with Forged and Casted Materials

Toshihiro Shimizu^{1)*}, *Hiromasa* Ikuta²⁾, *Tatsuya* Kato³⁾, *Toshiharu* Tanaka¹⁾, *Nobuyuki* Oyama⁴⁾, *Mitsuki* Asahina⁴⁾, *Yuji* Hasumi⁴⁾ and *Yuki* Nakamura¹⁾

1) Department of Mechanical Engineering, National Institute of Technology, Toyota College

2) Shinmei Industry Co. Ltd.

3) Kirin Brewery Co. Ltd.

4) Nippon Chuzo K. K.

Abstract: Fatigue crack propagation (FCP) behavior was studied on three kinds of zero thermal expansion (ZTE) alloy. The specimens manufactured by three different processes, *i.e.*, casting, forging and laser additive manufacturing: selective laser melting (SLM), were employed. The FCP rates in casted alloy were almost same with SS400 which was used for comparison. In SLM product, FCP rates were higher than casted alloy and slightly higher than forged alloy especially in low ΔK region. The characterization of fracture surfaces was conducted by scanning electron microscope. Through the observation, rough crack surface was observed in casted alloy, on the other hand, small marks along the crack propagate direction were

observed in SLM specimen. In order to consider the effective stress intensity factor range, the crack opening load was measured to estimate FCP behavior. In evaluation by the effective stress intensity factor range, FCP rates of the specimens with three kinds of manufacturing processes were similar. From these results, it is concluded that the ZTE alloy, manufactured by SLM showed enough performance in FCP examination compared with forged alloy. The difference in the results between the two products is attributed to the difference in the fracture surface due to the different microstructure.

Keywords: additive manufacturing; selective laser melting; zero thermal expansion alloy; fatigue; fatigue crack propagation.



Received on Jul. 28, 2021; Accepted on Nov. 17, 2021

© 2022 The Iron and Steel Institute of Japan. This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

^{*} Corresponding author. E-mail: shimizu@toyota-ct.ac.jp, Address: National Institute of Technology, Toyota College, 2-1 Eisei-cho Toyota Aichi 471-8525



192

Additive Manufacturingで作製した機能性合金における 疲労き裂進展挙動の鍛造および鋳造材との比較

清水 利弘^{1)*}·生田 博雅²⁾·加藤 辰弥³⁾·田中 淑晴¹⁾· 大山 伸幸⁴⁾·朝比奈 充輝⁴⁾·蓮見 侑士⁴⁾·中村 裕紀¹⁾

Comparison of Fatigue Crack Propagation Behavior of Additive Manufactured Zero Thermal Expansion Alloy with Forged and Casted Materials

> Toshihiro Shimizu, Hiromasa Ikuta, Tatsuya Kato, Toshiharu Tanaka, Nobuyuki Oyama, Mitsuki Asahina, Yuji Hasumi and Yuki Nakamura

1. 緒言

航空宇宙分野における構造部材には, 過酷な環境で使用 される光学関連施設やセンサー台等をはじめ、高精度とと もに寸法安定性(低熱膨張特性)が要求されてきている¹⁾。 このため、 金属合金部材の熱変形に伴う精度の低下を抑え る低熱膨張合金が注目され、熱膨張率ゼロの合金を求めて 開発が進められてきている²⁾。またこうした合金の精密機 器への応用が進められており、強度特性の重要性も増して きている³⁾。一方, 金属材料における積層造形技術は,「付 加加工」として、切削などによる「除去加工」、鋳造、鍛造、 プレス等の「成形加工」に続く第3の加工法と称され、これ までの方法では作成できない形状の部品が作成できること はもとより、プロセスのデジタル化の進展に伴い、 複雑形 状を有する製品の作製に短納期化が見込めることから,適 用される例が増えてきている⁴⁾。金属3Dプリンタが実用化 されて以来、利用できる素材も多岐にわたっており、この ような材料の力学的性質の評価もされてきている。航空宇 宙用部品は多品種少量生産であるため、積層造形法が適し ている側面もある⁵⁾。こうした材料が変動する荷重を受け る構造部材として、容易にメンテナンスができない宇宙機 器などに用いられる場合,疲労特性の評価が肝要となる。 炭酸ガスレーザを搭載した従来の積層造形装置と比べて、 より高出力,高輝度であるYbファイバーレーザを搭載し た積層造形装置の開発に伴い,静的強度,弾性特性の点で 鋳造や鍛造による材料と比肩するものが得られるように なってきた⁶。しかしながら、金属3Dプリンタで作成され た材料の疲労き裂進展特性の研究はまだ少なく⁷⁾,特に低

熱膨張合金等, 高機能材料の評価はみられない。

本研究においては、熱膨張率の極めて低い低熱膨張材料 (以下,極低熱膨張合金)の疲労き裂進展特性を明らかにす るとともに,鋳造,鍛造,および積層造形といった,製造方 法の違いによる疲労き裂進展挙動の違いについてき裂開閉 口を考慮して明らかにするとともに考察を加えた。

2. 実験方法

2・1 供試材および試験片

供試材には日本鋳造株式会社で開発された極低熱膨張 合金の鋳造材, 鍛造材, および積層造形技術によって製造 された積層造形材を用いた。積層造形技術による造形に は,出力400 W級のYbファイバーレーザ (ビームスポット 径:約0.1 mm)を搭載した積層造形装置 (ドイツEOS 製 EOS M290)を使用した。供試粉末は極低熱膨張合金粉末で あり,粒径はSLM (Selective Laser Melting)に適した10~ 45 µmとした。本粉末は大気中,窒素ガスアトマイズ法に より作製した。また,レーザ走査方向としてはKimura and Nakamotoの方法⁶⁰を参考に1層ごとに67°回転させて造形 した。なお,レーザ走査方向を90°ずつ変化させて積層造 形した inconel718についてき裂進展挙動に異方性が見られ たという報告がある⁷⁰。

Table 1. Chemical composition of ZTE alloy (mass%).

| | С | Si | Mn | Ni | Со | Fe |
|---------------|-------|------|------|------|-----|---------|
| SLM powder | 0.001 | 0.01 | 0.01 | 33.1 | 4.2 | balance |

2021年7月28日受付 2021年11月17日受理 (Received on Jul. 28, 2021; Accepted on Nov. 17, 2021)

- 2) 新明工業(株) (Shinmei Industry Co. Ltd.)
- 3) キリンビール(株) (Kirin Brewery Co. Ltd.)
- 4) 日本鋳造(株) (Nippon Chuzo K. K.)

© 2022 The Iron and Steel Institute of Japan. This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.ja).

¹⁾ 豊田工業高等専門学校機械工学科 (Department of Mechanical Engineering, National Institute of Technology, Toyota College)

Corresponding author. E-mail: shimizu@toyota-ct.ac.jp, Address: National Institute of Technology, Toyota College, 2-1 Eisei-cho Toyota Aichi 471-8525

本研究で用いた極低熱膨張合金の化学的組成と、積層造 形品用の粉末の化学成分の一例をTable 1に示す。また、JIS Z2241に従って試験した各供試材の力学的な材料特性を Table 2⁸⁾に示す。 鍛造材は四方から均等にプレス鍛造した ものである。積層造形技術で作成された材料に関しては, その基本的な静的力学特性が調査されており, 鍛造材と比 較して、大きな材料特性の違いはないと結論付けられてい る⁸⁾。また, すべての製造材に対して静的引張試験におい て伸びや絞りが大きいことから,比較対照材料として一般 構造用圧延鋼材(以下SS400)の結果を用いた。SS400は, 文献2)の冒頭にも触れられているとおり、本研究で用い た極低熱膨張合金と同様, 延性を持つ汎用の鉄鋼材料で, かつ通常の熱膨張係数を持つ材料として比較対象とした。 代表的な鉄鋼材料のき裂進展特性との比較を行うことで, SS400と他の材料の比較を行っている研究とのつながりを 持たせることができると考えた。

Fig.1に,今回実験に用いた鋳造, 鍛造および積層造形さ れた供試材(以下,鋳造材,鍛造材および積層材)の組織を 光学顕微鏡で観察した結果を示す。観察の際には表面を研 磨後,HF希釈液を用いてエッチングを行い,光学顕微鏡で 組織観察を行った。図より,鋳造材にはデンドライト組織 が見られ,鍛造材には双晶が確認できた。また,積層造形 法で作製されたものでは,報告^{9,10}に見られるように積層 方向(z方向)側面から観察すると,xzおよびyz面には,積 層方向に向けてメルトプールが観察された。また積層方向 から見たxy面には粒状の等方の組織が観察された。すなわ ち,組織の方向依存性が確認された。なお,今回の観察倍率 では,積層材の組織に空隙等の欠陥は認められなかった。

試験片は, Fig.2に示す疲労き裂進展用試験片(CT試験 片)をワイヤー放電加工によって作成した。試験片の厚さ た は鋳造材, 鍛造材および積層材についてそれぞれ, t=10.0 mm, 11.54 mm, 6.73 mmであった。試験片背面には, 疲労

Table 2. Mechanical properties of ZTE alloy⁸).

| Process | Tensile strength MPa | 0.2% proof stress MPa | Elongation % | Reduction of area % | Young's modulus GPa |
|---------|-------------------------|-----------------------------|--------------|---------------------------|---------------------------|
| SLM | 479 | 323 | 45 | 82 | 131 |
| Casting | 372 | 265 | 28 | 61 | 121 |
| Forging | 487 | 334 | 39 | 75 | 133 |
| | | | | | |

Test method: JIS Z2241 proportional test piece original gage length $L_0 = 60$ mm, diameter $d_0 = 10$ mm





Building direction

Fig. 1. Microstructures of ZTE alloy in (a) casted, (b) forged and (c) SLM.

試験中のき裂開閉口状態を確認するためにひずみゲージを 貼付した。積層材の試験片はFig.3に示すように板厚方向 に積層されている。

2·2 実験方法

疲労き裂進展 (FCP) 試験は電気油圧式サーボ疲労試験 機(島津製作所サーボパルサー 容量:100 kN)を用い て,室温大気中で行った。応力比*R*=0.05,繰返し速度*f*= 20 Hzとした。また,応力拡大係数(*K*)の計算には以下の Srawleyの式¹¹⁾を用いた。

 $K = PF(a/W)/(tW^{1/2})$ $F = \left((2+\xi)/(1-\xi)^{3/2} \right) \left(0.886 + 4.64\xi - 13.32\xi^{2} + 14.72\xi^{3} - 5.6\xi^{4} \right)$

ここに、 $\xi = a/W_{\circ}(a: i)$ を裂長さ、t: 板厚, W: 板幅)



t = 10.00 (casted), 11.54 (forged) and 6.73 (SLM)





Fig. 3. Building direction of specimen in SLM.

実験は、 $\Delta K = 2.0 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}, f = 20 \text{ Hz}の疲労荷重を試験片$ に負荷し, N=1000 cycleごとにき裂発生を確認した。試験 片両面においてき裂発生が認められたことで予き裂の導入 とした。予き裂導入後、 ΔK を0.1 MPa \sqrt{m} 低下させて疲労 荷重を負荷し、き裂進展がみられたらさらにΔK=0.1 MPa √m低下させて疲労荷重を負荷した。繰返し数N=20000 cycleでき裂進展が見られなかったときのΔKをき裂進展下 限界値 $\Delta K_{\rm th}$ とした。疲労試験は ΔK を0.1 MPa \sqrt{m} 増加させ て開始し、その後は荷重を一定として繰返し負荷した。一 定回数 (N=2000~5000 cycle) ごとにレプリカ法を用いて き裂長さを測定し、き裂長さ増加分daを、それまでの繰返 し数dNで除することにより、その実験中のΔKにおけるき 裂進展速度 da/dNを求めた。また、破断後に破断面を走査 型電子顕微鏡で観察し,破断面とき裂進展速度,さらにΔK との関係を考察した。次に除荷弾性コンプライアンス法に より, き裂開口点を求め, ΔK_{eff}による整理を行い, 考察を 加えた。

3. 実験結果および考察

3・1 き裂進展特性

鋳造により作成された試験片のき裂進展試験結果と著 者らの実験によって得られたSS400の結果との比較を da/ dN- ΔK 曲線で表したものを Fig.4 に示す。図より、どちらの 材料に関しても、 $\Delta K = 2.0$ MPa \sqrt{m} 付近でき裂進展は減速 し、き裂進展の下限界 ΔK_{th} が認められた。また、それ以上 の応力拡大係数域では、一定の傾きの直線とみなされる進 展特性を示した。このうち、鋳造による極低熱膨張合金試 験片による結果は、 ΔK が10 MPa \sqrt{m} 以上の領域において、



Fig. 4. $da/dN-\Delta K$ relationships of casted ZTE alloy and SS400.

高速度側にあるが、全体としてSS400のき裂進展特性に類 似しているといえる。下限界応力拡大係数値は、SS400が $\Delta K_{\rm th} = 2.0 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$, 鋳造材では、 $\Delta K_{\rm th} = 1.8 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ であっ た。第 II b領域における Paris則の乗数 m^{12} については、 SS400および鋳造による試験片はそれぞれm = 2.0および 2.6となり、SS400のほうが小さい値となった。

次に、極低熱膨張合金の、鋳造材、鍛造材および積層材 のき裂進展結果を $da/dN-\Delta K$ 曲線で表したものFig.5に示 す。図より、鍛造材と積層材では、ともに鋳造材よりき裂 進展速度が低 ΔK 領域において高速度側にあることがわか る。また、鍛造材と積層材を比較すると、積層材のほうが $\Delta K = 2.0 \sim 5.0 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ の領域でき裂進展速度が早い傾向が 見てとれる。下限界応力拡大係数値は、鍛造材が $\Delta K_{\text{th}} = 2.0 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ 、積層材は、 $\Delta K_{\text{th}} = 1.6 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ であった。このこと から、積層材は、 $\Delta K_{\text{th}} = 1.6 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ であった。このこと から、積層材は、他の製法と比較して小さい ΔK でき裂進 展を生じることがわかる。き裂進展速度増加が一定の範囲 における Paris則の乗数*m*については、鍛造材および積層材



Fig. 5. Comparison of $da/dN-\Delta K$ relationships in ZTE alloy.

はそれぞれ*m*=1.8および1.6であり, 鋳造材と比較して小 さい値になった。

3・2 き裂形状

前節において見られたき裂進展特性の違いの原因の一 つとして、き裂経路の形状(屈曲)の違いが考えられる。 Fig.6に, 破断前の試験片におけるΔK=2.5 MPa√m付近の き裂経路の形状を光学顕微鏡で観察したものを示す。これ を見ると、鋳造材におけるき裂の進展経路は、他の製法と 比較して大きく屈曲していることがわかる。そこで,各製 造方法における試験片について,破断した試験片の破面を 走査型電子顕微鏡で観察した。観察結果をFig.7に示す。ま ず,低倍率の観察より,鋳造材は,他の製法と比較して凹 凸が顕著であることがわかる。これは、Fig.6でも見られた 鋳造材の特徴である。他の2種類の材料は平坦なき裂面で あった。また、特に積層材には、き裂進行方向に垂直な薄 い縦縞模様が見られ、き裂の各部で進展が偏ることがな く,同様の進展が起きたことがわかる。高倍率の写真から, 鋳造材, 鍛造材は比較的凹凸が目立つ破面を呈しており, 積層材の場合は,比較的平たんでありき裂進展方向に沿っ た線状の段差が破面全体に見られることが特徴である。こ れらの観察結果より、3種類の試験材料は、それぞれ、き裂 (破断)面に特徴をもっていることがわかった。また,破面 の観察においても組織の欠陥は認められなかった。

3・3 き裂開閉口の考慮

実験中に試験片背面に取り付けたひずみゲージにより測定したひずみと荷重の関係を調べた結果,得られた荷重-ひずみ曲線を見ると,多くの条件下において,荷重-ひずみ曲線に屈曲点が見られることがわかった。一例として鋳造材における $\Delta K = 1.94$ MPa \sqrt{m} での荷重-ひずみ曲線を Fig.8に示す。この図に見られる屈曲点は,き裂開閉口を生じた荷重 P_{op} を示しており,この荷重以下ではき裂は開口していないと考えられる。この開閉口荷重の最大荷重に対する荷重比 (P_{op}/P_{max})を,応力拡大係数範囲 ΔK の変化とともに表したものをFig.9に示す。図には,SS400による結果も併記した。この図から,いずれの材料の試験片においても,試験初期に比較的大きな荷重比を示した後に次第に減



Crack growth direction

Fig. 6. Comparison of crack paths observed on a side of specimen during FCP tests in (a) casted, (b) forged and (c) SLM.

少し、 ΔK が10 MPa \sqrt{m} を超えると、10%以下になることが わかる。この図から、SS400や鋳造材は、他の極低熱膨張合 金材と比較して ΔK が10 MPa \sqrt{m} 以下の領域において明ら かにき裂開閉口荷重が全荷重に対して高い割合であること がわかる。このことは、これらの材料ではき裂が開口しに くいことを意味しており、同じ荷重を負荷しても、その荷 重が他の製法と比較してき裂進展に有効に働かないことが 予想される。き裂開閉口現象には、破面粗さ誘起き裂閉口 のほかに、塑性誘起き裂閉口などがあり¹³⁾、今回行った実 験に用いた材料の製造方法による違いに基づいて考慮する 必要がある。塑性誘起き裂閉口に関しては、Table 2より、 弾性定数や0.2%耐力が低い鋳造材に関しては、塑性変形



Fig. 7. SEM Micrographs of fracture surface in (a) casted, (b) forged and (c) SLM. Figures (b), (d) and (f) are high magnification views of (a), (b) and (c) respectively.

領域が大きくなり、これがき裂開閉口特性に影響を与える 可能性があると考えられる。しかしながら、鍛造材と積層 材の材料特性は似かよっており、塑性変形の領域もほぼ同 様と考えられる。したがってここでは、破面粗さ誘起き裂 閉口について考慮する。

Fig.6やFig.7で見られたき裂(破断)面の滑らかさは P_{op} / P_{max} に影響を与えている。Fig.9よりこの値は、鋳造材、鍛造材、積層材の順に低い値になっている。特に積層材では、き裂開口荷重割合は ΔK = 3.0 MPa \sqrt{m} あたりから10%程度となっており、したがって、Fig.6 (e)で見られたき裂進展方向に沿った線状の段差はき裂開口には障害とならなかっ



Strain at specimen back surface %

Fig. 8. Measurement of crack opening point.



Fig. 9. Relationships between crack opening ratio (P_{op}/P_{max}) and the stress intensity factor range ΔK .

たことが示唆された。これは, Fig.3において破線で示した 各積層面の界面が, 試験片のき裂面 (xz面) においてはき 裂の進展方向 (x方向) を横切らないため, 比較的き裂開閉 口がスムーズなき裂面になったと考えられる。

次に,除荷弾性コンプライアンス法¹⁴⁾より求めたき裂開 閉口を考慮した有効応力拡大係数範囲ΔKerrを算出し、き裂 進展速度との関係を $da/dN-\Delta K_{eff}$ 曲線に表したものをFig.10 に示す。この図から,有効応力拡大係数範囲△K_{eff}を考慮す ることによって、 鍛造材料と積層材は $\Delta K = 2.0 \text{ MPa} \sqrt{m}$ 付 近で、これを考慮しないFig.5の結果よりよく一致してい ることがわかる。Fig.9より、鍛造材のき裂開口点は積層材 の開口点より高いことがわかるが、この開口点の違いを考 慮することでFig.10に示すda/dN-ΔK_{eff}曲線が一致している ことが見てとれる。き裂進展速度増加が一定の範囲におけ るParis則の乗数mについても, 鍛造材および積層材は共 に, m=1.6であり, 一致している。また, 鋳造材による乗 数はm=1.7であり、き裂進展特性も、き裂開閉口挙動を考 慮することでかなり他の製造法による材料の結果に近づ くことがわかる。SS400についてはm=1.4であり,全体に 低速度側にあることから、この違いはSS400と極低熱膨張 合金の材料特性 (縦弾性係数や降伏点の違いによるき裂前 方に発生する塑性域の違いなど) に起因するものと考えら れる。これまでの結果より,極低熱膨張合金は,その製造 法によって疲労き裂進展挙動は異なり、 鍛造材や積層材は 鋳造材よりはき裂進展速度が速くなったが、その違いは組 織の違いによるき裂面の性状に起因する可能性が示唆さ れた。また、3Dプリンタによって積層造形された材料に関 しては, 鍛造材と比較してき裂開閉口挙動を考慮しない場 合,わずかに高速側となったが、これは欠陥などによるも





Fig. 10. da/dN- ΔK_{eff} relationships of ZTE alloy and SS400.

のではなく, 積層造形された材料がなめらかな破断面を有 することが原因として考えられる。しかしながら, き裂面 にも, 明らかな異方性や欠陥等も見られず, 鍛造材との速 度の違いもわずかであることから, 今回用いた積層材が, 鍛造材に対して疲労き裂進展挙動が劣っているとはいえ ず, 安心して積極的に利用することができる段階になって きている。ただし,本研究において, 3Dプリンタによる造 形物における下限界応力拡大係数値 $\Delta K_{\rm th} = 1.6 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ と, 他の製法より低い値であったことは,注意が必要であろ う。また,積層材については,他の方向の試験片について も今後実験を行う予定である。

4. 結言

極低熱膨張合金について鋳造材, 鍛造材および積層材よ り試験片を作成し,これを用いて疲労試験を実施して,き 裂進展挙動の検討を行った。

得られた結果を以下に示す。

- (1) 鋳造材のき裂進展特性は、全体としてSS400のき裂進 展特性と類似していた。
- (2) 鍛造材のき裂進展特性は鋳造材のき裂進展特性と比較 して低ΔK領域において高速側になった。
- (3)積層材のき裂進展特性は鍛造材のものよりわずかに高 速側となった。
- (4) き裂面の観察の結果,鋳造による試験片はき裂面の凹 凸が大きく,積層材は,き裂進展方向に沿った線状の 段差が見られた。
- (5) き裂開口荷重の最大荷重に対する割合は,積層材,鍛造材,鋳造材の順に大きくなり,SS400による結果が 最も大きくなった。
- (6) 有効応力拡大係数範囲 ΔK_{eff} でき裂開閉口を考慮する ことによって、各製造法による材料のき裂進展速度 $-\Delta K_{eff}$ 関係はほぼ同一となった。

謝辞

本研究の遂行にあたって豊田鉄工株式会社上智樹氏,豊 田工大大学院有本拓馬氏に実験に協力をいただいた。ま た,本稿作成について中島正貴氏に指導いただいた。記し て謝意を示す。

文 献

- S.F.Jacobs: Opt. Acta, 33(1986), 1377. https://doi.org/10.1080/ 713821886
- 2) T.Handa and N.Kurusu: Sokeizai, 55(2014), 28 (in Japanese).
- 3) M.Kishida and T.Masumoto: *Materia Jpn.*, **36**(1997), 1080 (in Japanese). https://doi.org/10.2320/materia.36.1080
- 4) H.Kyogoku and T.-T.Ikeshoji: *Mech. Eng. Rev.*, 7(2020), 19-00182. https://doi.org/10.1299/mer.19-00182
- 5) H.Ikeda and T.Masuoka: J. Jpn. Soc. Precis. Eng., 82(2016), 639 (in Japanese). https://doi.org/10.2493/jjspe.82.639
- 6) T.Kimura and T.Nakamoto: J. Jpn. Inst. Light Met., 66(2016), 167 (in Japanese). https://doi.org/10.2464/jilm.66.167
- 7) J.Denny, A.N.Jinoop, C.P.Paul, R.Singh and K.S.Bindra: *Mater. Lett.*, **276**(2020), 128241. https://doi.org/10.1016/j.matlet. 2020.128241
- 8) N.Oyama, K.Kitamoto, T.Handa and M.Asahina: Proc. SPIE, 11451(2020), 11451116. https://doi.org/10.1117/12.2560758
- 9) H.Choo, K.-L.Sham, J.Bohling, A.Ngo, X.Xiao, Y.Renb, P.J.Depond, M.J.Matthews and E.Garlea: *Mater. Des.*, 164(2019), 107534. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.12.006
- T.M.Rodgers, J.D.Madison and V.Tikare: Comput. Mater. Sci., 135(2017), 78. https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2017.03.053
- J.E.Srawley: Int. J. Fract. Mech., 12(1976), 475. https://doi.org/10. 1007/BF00032844
- 12) P.Paris and F.Erdogan: J. Basic. Eng., 85(1963), 528. https://doi. org/10.1115/1.3656900
- 13) H.Kobayashi: Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng. A, 49(1981), 771 (in Japanese). https://doi.org/10.1299/kikaia.49.771
- 14) M.Kikukawa, M.Jono, K.Tanaka and M.Takatani: J. Soc. Mater. Sci. Jpn., 25(1976), 899. https://doi.org/10.2472/jsms.25.899