

## Abstract of Doctoral Thesis

### **Title : Analysis of notched specimens made of traditionally and additively manufactured metals subject to multiaxial non-proportional low cycle fatigue**

Doctoral Program in Advanced Mechanical Engineering and Robotics  
Graduate School of Science and Engineering  
Ritsumeikan University

ブレッサン ステファノ  
BRESSAN STEFANO

This study analyzes uniaxial and multiaxial non-proportional low cycle fatigue behavior of notched specimens made by traditionally manufactured materials and additionally manufactured materials. The first part of the work is focused on the analysis notched components made of stainless steel SUS316L which fatigue life was initially evaluated with Itoh-Sakane model (I-S) which considers non-proportional loading and stress concentration factor  $K_{t,n}$ . The tests showed that the crack initiation site was shifted from the notch tip. The cause of such finding was investigated through a finite element analysis (FEA). The FEA showed that the maximum strain was located away from the notch tip, and the distance depended on  $K_{t,n}$ . A new stress concentration factor based on the crack initiation site was employed to modify I-S model improving the results. Further tests have been conducted on notched specimens made of A6061. The crack initiation site was located at the notch tip for each notch geometry. I-S model has been further modified with the Bäuml-Seeger model and the fatigue notch factor. Fatigue life evaluation sensibly improved compared to the previous model. Successively, cyclic plastic behavior of additionally manufactured (AM) specimens of Ti-6Al-4V was analyzed. Fatigue tests have been conducted on four varieties of specimens depending on layer orientation and stress-relief heat treatment. Microstructure has been analyzed and it was similar for every specimen type. A higher energy absorption by the heat-treated component was detected probably due to the less residual stresses compared to the not-heat treated samples. Layer orientation influenced the final crack propagation velocity although the causes have not been verified. A drastic softening at the beginning of the test was detected and attributed to the early formation of cracks located on the voids inside of the specimens. Fatigue life resulted similar for each specimen type and therefore not influenced by residual stresses, layer orientation and initial softening. Notched specimens made with the same AM material were also tested. The main crack initiation site was located on the notch tip. Fatigue life was lower on the specimens where crack initiation site was located on defects, regardless of layer orientation or heat treatment. The applicability of the modified I-S model for AM materials is finally discussed along with future developments.

## 博士論文要旨

論文題名：機械加工および積層造形で作製した切欠き材料  
の非比例多軸応力下における低サイクル疲労強度立命館大学大学院理工学研究科  
機械システム専攻博士課程後期課程ブレッサン ステファノ  
BRESSAN STEFANO

本研究では、従来の機械加工法および新しい積層造形法により作製した金属材料の平滑試験片および切欠き試験片を対象に、単軸負荷および非比例負荷を含む多軸負荷条件下の低サイクル疲労挙動を解析・評価した。

本論文の前半は、非比例負荷および応力集中係数  $K_{t,n}$  を考慮した Itoh-Sakane モデル (IS) を用いて疲労寿命を評価したオーステナイト鋼 SUS316L の切欠き部材の評価について言及している。この試験では、き裂発生部は切欠き底からその周辺部へと移動することを示した。この原因を調査するため FEM 解析を行い、最大ひずみが切欠き先端から離れた場所に位置していることを見出し、その距離は応力集中係数  $K_{t,n}$  に依存していることを示した。さらに、き裂発生部のひずみ集中係数に基づく IS モデルの修正を行うことにより、寿命評価結果を大幅に改善した。一方、アルミニウム合金 A6061 の切欠き試験片では、き裂発生部は各切欠き形状に対して切欠き底であり、切欠き底でのき裂の発生個所は材料に依存をすることを言及した。また、このような材料依存性に起因する非比例多軸負荷での繰返し硬化を考慮に入れた Itoh-Sakane モデルでは、Bäumel-Seeger モデルと切欠き係数に対してさらなる修正を行い、疲労寿命評価は先行モデルと比較してかなり向上することを示した。

上述と同様に積層造形法を用いて Ti-6Al-4V 合金により作製した積層方向と熱処理の異なる 4 種類の試験片の評価を行った。4 種類の試験片の違いによる微視組織は類似していたものの、繰返し塑性変形挙動は差異が見られた。とくに熱処理を施した試験片は残留応力が低いため、熱処理を施していない試験片と比較すると、ひずみエネルギーの吸収が高いことが確認された。また、積層方向は、疲労寿命の直前のき裂進展速度に影響を及ぼした。その原因はまだ明らかにできていないがものの、試験片内部の欠陥の初期形成が原因と思われる試験開始直後の急激な軟化と関係性があると推定した。しかしながら、4 種類の試験において寿命終期の破断挙動には差は見られたものの、疲労寿命はほぼ同程度であった。これらのことから、疲労寿命は、残留応力や積層方向および初期軟化の影響はほとんどないことを示した。

上述と同じ積層造形法および Ti-6Al-4V 合金の切欠き試験片を対象とした試験も実施した。同試験材料のき裂発生部はいずれも切欠き底の欠陥部に位置し、疲労寿命は積層方向や熱処理の違いに関係なく、機械加工の試験材料に比べて同程度に低下することを実験的に示した。ただし、Ti-6Al-4V 合金の積層造形材料に対して、変形特性・破壊特性と寿命特性に対しては実験的にある程度明らかにされたものの、修正 Itoh-Sakane モデルの適用性については今後のさらなる検証を行う必要があり、その検討課題を提示した。