

悪路走行における二輪車フレームの 疲労寿命予測技術

Fatigue Life Prediction of Welds in Motorcycle Frames on a Rough Road

坂本 和信

Abstract

Product life cycles are shortening hand-in-hand with diversification and individualization of customer needs. To respond to these changes, we are working to expand our product lineup and shorten development lead times. In addition to this, two aspects we have focused on to date - reducing weight and vibrations - remain indispensable development requirements for creating attractive products. However, amongst these wide-ranging targets for motorcycle development, the customer safety elements of durability and reliability must always be our highest priority. The platform development that we have been implementing in recent years introduces yet another requirement from the perspective of global roll-out - the need to factor in diverse usage environments.

In the pursuit of vehicle durability, we have worked to streamline testing through evaluation of individual parts and bench testing that replicates the actual running test, as well as reduce the number of prototypes and evaluation tests through design verification using CAE. However, the current development strategy demands that we not only streamline but also identify issues upstream, clarify the tradeoffs, and come up with the optimum solution in a short period of time. In response to this we have developed the fatigue analysis process detailed in this report to enable design-stage verification of welds for frame durability.

1 はじめに

お客様のニーズが多様化・個性化するのにもとない、商品ライフサイクルの短期化が進んでいる。この変化に対応するため、当社では商品ラインアップの拡充と開発リードタイムの短縮を進めている。加えて、従来から重点的に取り組まれてきた軽量化・低振動化も依然として商品魅力の創出に不可欠な開発要素である。このような多岐にわたる二輪車の開発目標においても、耐久性・信頼性はお客様の安全に関わる最優先事項である。さらに、近年当社が進めているプラットフォーム開発では、グローバル展開を視野に、世界各国の路面状態といった多様な使用環境を想定しておく必要がある。

車体耐久性の開発では、これまでも単品部品での評価や実走行状態の台上再現による試験効率の向上、そしてCAEを用いた設計検証による試作数、評価試験数の削減を進めてきた。しかし、昨今の開発環境下では効率向上に加えて、課題を上流で洗い出し、背反を明らかにした上で最適解を短時間で得ることが求められている。そこで本稿では、試作評価の繰返しによる造り込みが行われてきたフレーム溶接部の耐久性について、机上検証を可能にする疲労解析技術を開発したので報告する。

2 疲労解析技術開発の背景

2-1. 疲労き裂発生原因と従来の評価手法

当社の主力商品であるアセアン向けモデルや一部のスポーツモデルには鋼管を主体としたスチール製のフレームが採用されている。スチールフレームは様々な板厚、形状の部材をアーク溶接で組み合わせることで必要十分な剛性を確保している。そのため、総溶接長が10m以上に及ぶモデルもある。図1に代表例を示す。図中の赤い箇所は溶接部である。

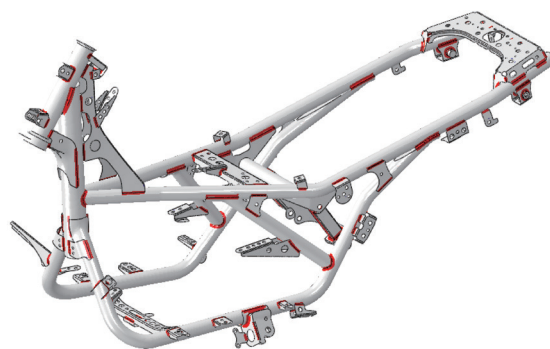


図1 スチールフレーム例

フレームは乗員、積荷、そして走行路面の影響を受けて刻々と変化する負荷に晒されている。金属材料はそのような繰返しの負荷を受けると疲労を起こし、き裂を生じる。スチールフレームでは、溶接によって形成されるビードの余盛と

母材表面の境界（止端）にき裂を生じやすい。これは、止端に生じる応力集中と溶接熱履歴による材料強度の低下が主要因である。しかし、溶接熱履歴による材料強度低下を避けることは一般的に困難である。そのため、対策には応力集中の緩和が施される。応力集中の原因は部材が組み合わされることによる構造不連続と溶接ビードによる形状不連続に大別されるが、溶接ビード形状による対策は製造コストの増加を招くとともに確実な効果を見出すための試行錯誤が必要となる。そのため多くの場合、継手部での剛性変化を小さくし、構造不連続による応力集中を緩和する対策手法が用いられる。その対策指標のひとつが止端部での応力を溶接部近傍の応力分布の外挿から求めるホットスポット応力である（図2）^[1]。この方法は連続的な測定点が不要なため、ひずみゲージを用いた計測、または比較的メッシュサイズの粗いFEM（有限要素解析）で実施可能であり、簡便な評価手法として利用されてきた。

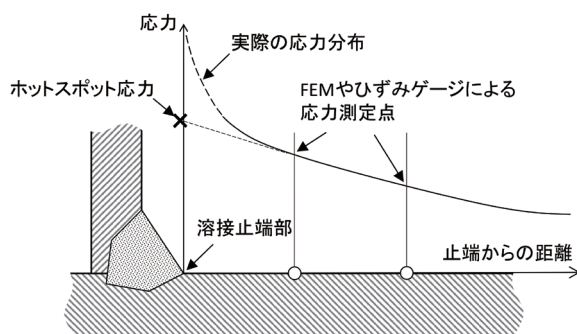


図2 ホットスポット応力の定義

2-2. ホットスポット応力法の課題

ホットスポット応力法は広く実用されている手法であるものの、二輪車の溶接継手への適用に対してはいくつかの課題があった。

図3に形式の異なる継手を用いた疲労試験結果を示す。継手Aと継手Bは同様の傾向を示しているが、継手Cと継手Dの疲労強度線図は下方に位置している。このようにホットスポット応力を用いたとしても、過不足の無い疲労設計を行うためには溶接継手の形式や板厚、負荷形態によって評価基準を使い分ける必要がある。しかし、そのような複雑さを伴う評価基準は判断ミスを招く恐れがある。さらに、二輪車ではスペースの制約上、図4に示すような複数の補強部材が近接した溶接部が多数存在する。そのような箇所ではホットスポット応力の精度不足が懸念され、耐久試験での確認評価に頼らざるを得ない原因となっていた。

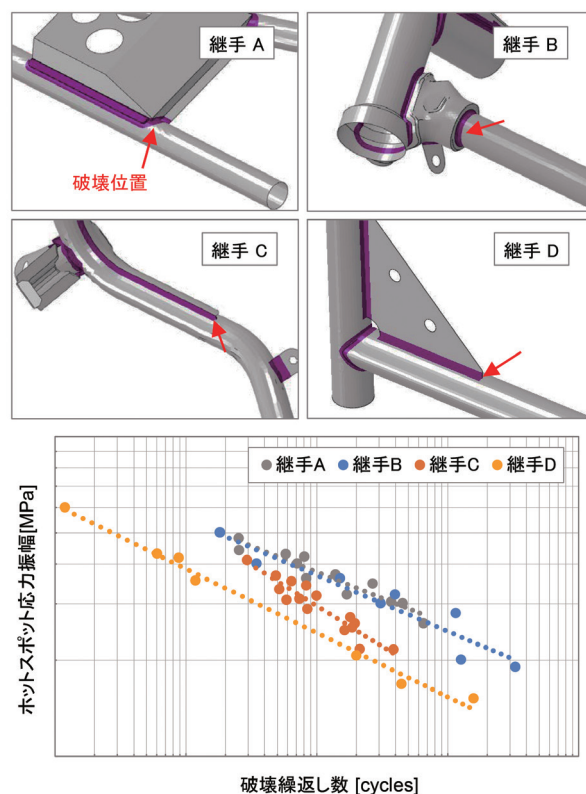


図3 ホットスポット応力と破壊繰返し数の関係



図4 溶接継手例

3 新しい解析手法

3-1. 疲労き裂の成長挙動

上述の課題に対して、溶接継手を対象とした新たな疲労解析手法が近年提案されている^[2]。

図5は、き裂発生箇所近傍における疲労試験中のひずみ振幅の履歴である。試験開始後、ひずみ振幅は徐々に減少し、ある領域を境に急速に低下する。図6は、ひずみ振幅が初期値から20%および80%低下した時点で疲労試験を終了し、き裂を観察した結果である。このように、き裂を生じる

と即座に構造としての機能を失うわけではなく、き裂は長い期間をかけて少しずつ成長し、最終段階で急速破壊に至る。

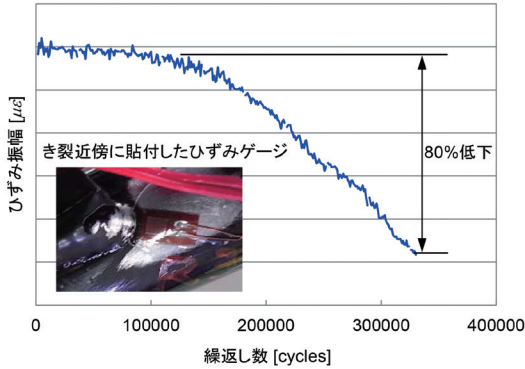


図5 疲労試験中のひずみ振幅履歴

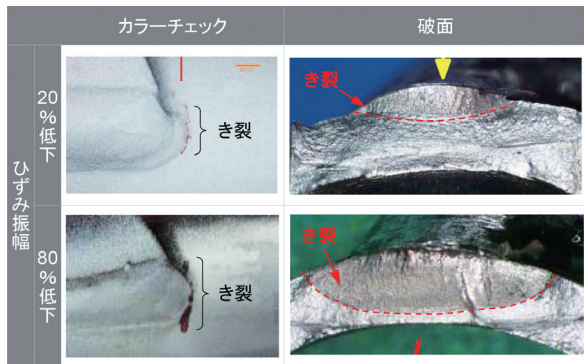


図6 き裂の観察結果

3-2. マスターS-N線図アプローチ

そこで、き裂の成長速度に強く影響する止端部の応力場および板厚によって、式 (1) を用いて応力値を補正する。

$$\Delta S_s = \frac{\Delta \sigma_s}{t^{2m} \cdot I(r)^m} \quad (1)$$

ここで、 σ_s は溶接ビードによる局所的な応力集中を含まない構造応力、 t は板厚、 $I(r)$ と m はき裂成長速度の影響を補正する係数である。そして、それらから求める S_s を等価構造応力と呼ぶ。本手法における構造応力は、FEM にて溶接止端部断面の分布荷重から膜応力と曲げ応力を分離して求めることで、止端部の応力を直接算出する。そのため、複雑な溶接継手に対しても精度の良い評価が期待できる。

図 7 は前述の 4 種類の異なる溶接継手に対して本手法を適用した結果である。疲労試験結果は狭い帯状に分布し、1 本のマスター S-N 線図を得ることができた。これにより、多種多様な溶接継手に対して評価基準を分けることなく、簡便な評価が可能になる。

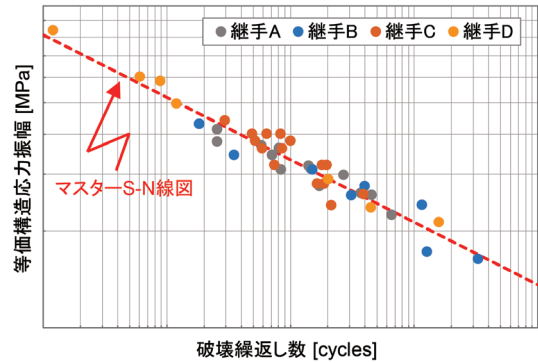


図7 等価構造応力と破壊繰返し数の関係

4 フレームへの適用

4-1. 実働荷重下における疲労解析

悪路走行時のフレームでは不規則で複雑な応力波形が観測される。そのような実働荷重下での耐久性予測では、応力頻度の読み取りと蓄積されていく疲労損傷を適切に処理する必要がある。ここではレインフロー法とマスター S-N 線図に基づく線形累積損傷則を用いて疲労被害度の算出を行った。一連の疲労解析プロセスを図 8 に示す。

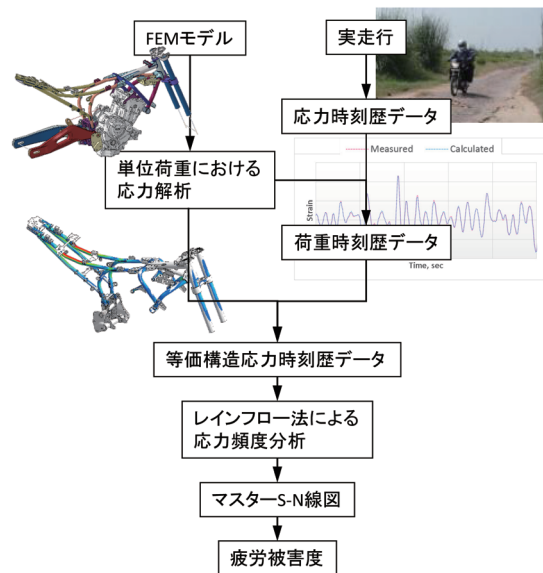


図8 疲労解析プロセス

4-2. 疲労解析結果

3D 設計データから作成した FEM モデル、悪路走行データから算出した荷重波形、そしてマスター S-N 線図を用いて疲労被害度を算出し、耐久試験の結果と比較を行った。結果を図 9 に示す。解析で疲労被害度が高い箇所は耐久試験でき裂が確認された位置と一致しており、本手法の妥当性を確認した。

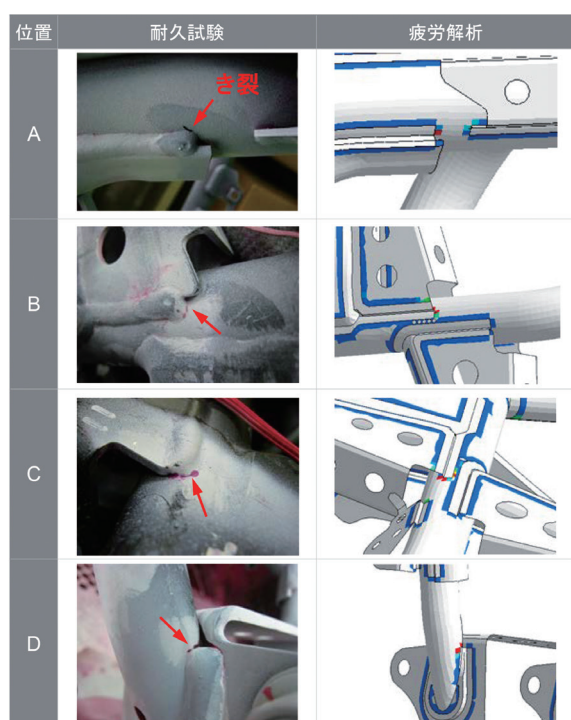
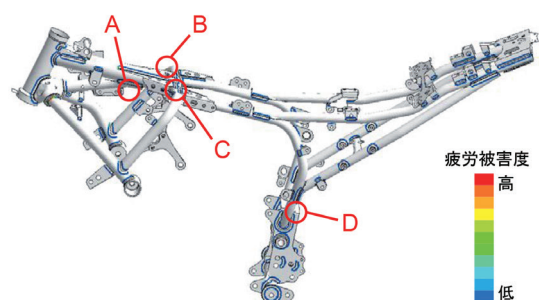


図9 疲労解析結果

4-3. 量産開発モデルへの適用

当初、本手法は従来の応力解析に比べ評価部の抽出やメッシュの修正など多くの解析準備作業が必要であった。そこで量産開発に適用するにあたり、パッチプロセスを開発し作業の効率化を進めた。その結果、従来の応力解析と同等の作業工数を達成し、量産新規部品への適用が開始されている。

適用例を図10に示す。耐久試験にて図10(a)の疲労被害度が高い部位からの破損を確認した。そこで複数の対策設計案に対して疲労解析による評価を実施した。結果として、再度の耐久試験を行う前に、製造性や周辺部品への影響を踏まえた上で、耐久目標値を上回る設計案の選定を行うことができた。

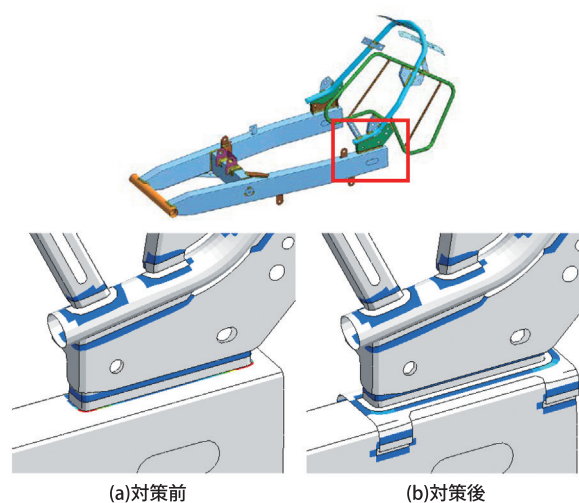


図10 疲労解析による設計検討例

5 おわりに

本稿では主に解析技術について述べたが、耐久性開発には、お客様の使用環境を正しく把握し、それを評価試験に反映する実験・計測技術、そしてデータとモノに乖離のない製造品質が欠かせない。近年、当社は二輪車に軽量材料・新構造を積極的に採用している。それらはこれまでに蓄積してきた技術の結実である。今後も、現象に向き合い、原理原則に基づいて、新しい価値創造に貢献していきたい。

■参考文献

- [1] 日本鋼構造協会編：鋼構造物の疲労設計指針・同解説、技報堂出版
- [2] Dong, P., Hong J.K., and De Jesus, Abilio M.P., Journal of Pressure Vessel Technology Vol 129, pp 355-362, August 2007.

■著者



坂本 和信
Kazunobu Sakamoto
PF車両ユニット
PF車両開発統括部
車両実験部