

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月23日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22560084

研究課題名（和文） 部品接触部の水素による疲労強度低下の下限予測手法の確立

研究課題名（英文） Development of prediction method of the reduced fatigue strength at contact part between components that is caused by the effect of hydrogen

研究代表者

久保田 祐信 (MASANOBU KUBOTA)

九州大学・工学研究院・教授

研究者番号：50284534

研究成果の概要（和文）：

水素利用は、エネルギー問題・環境問題の解決策として有望であるが、水素には金属の強度を悪化させる問題がある。ここでは、水素中で金属疲労と摩耗が同時に起こる場合について、機械部品の設計法を開発した。まず、水素により部品の疲労強度は大きく低下することを示し、次にその原因は、水素中特有の摩耗と水素が亀裂発生を促進するためであることを明らかにした。このような水素中の独特な強度低下機構に基づき、破壊力学を適用して、水素中で使用される部品の設計法を確立した。

研究成果の概要（英文）：

Hydrogen is the most promising means of solving the energy and global environment issues. However, hydrogen deteriorates strength of metallic materials. In this study, a design method in which the effect of hydrogen is considered is developed, particularly for the components of hydrogen equipment involving contact part. Firstly, a significant reduction in the fatigue strength of the contact part is characterized. The causes of the reduced fatigue strength, which are the specific wear in hydrogen and the assist of crack nucleation by hydrogen, are then elucidated. Based on fracture mechanics, the design method of the components of hydrogen equipment involving contact is established by considering these mechanisms that hydrogen causes the reduction in fatigue strength.

交付決定額

(金額単位：円)

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|-----------|---------|-----------|
| 2010年度 | 1,100,000 | 330,000 | 1,430,000 |
| 2011年度 | 1,000,000 | 300,000 | 1,300,000 |
| 2012年度 | 600,000 | 180,000 | 780,000 |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 総計 | | | |

研究分野：金属疲労・材料力学

科研費の分科・細目：5001

キーワード：水素、フレットィング、金属疲労

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

1. 研究開始当初の背景

水素はエネルギー源の多様化や地球規模の環境変動の解決策の一つとして注目されているが、水素は金属材料の強度を劣化させる「水素脆化」を引き起こす。一方、金属疲労は、現在でも道路インフラの劣化の一因となるなど、社会に深刻な問題をもたらす重大な問題である。水素エネルギーを安全に利用するためには、水素脆化と金属疲労が重畳する現象の解明が不可欠であり、現在、世界的に活発に研究がなされている。

本研究では、とくに水素利用機器の部品が接触する部分で生じる「フレット疲労」を対象とする。フレット疲労は、特殊な形態の摩耗（フレット摩耗）が生じる部分の金属疲労である。図1は疲労の負荷の大きさと、その負荷に対応した疲労寿命を表す疲労強度評価線図（ $S-N$ 線図）である。この図に示すように、フレット疲労では通常の金属疲労と比較して、顕著な強度低下が生じる。そのためフレット疲労は、原子力機器、ジェットエンジン、鉄道車両など多くの機械で研究がなされている。

水素脆化は金属疲労と摩耗の両方に影響を与えるために、水素が金属疲労あるいは摩耗に単独に作用する場合に比べて複雑な現象が起こることが予想される。その結果として、部品接触部の疲労強度が著しく低下するようなことがあれば、破壊事故を防止する安全な設計法の確立が不可欠である。



図1 金属疲労とフレット疲労の比較、および予想される水素の影響

2. 研究の目的

本研究では、フレット疲労強度に及ぼす水素の影響評価、水素が影響を及ぼすメカニズムの解明、および、水素中で使用される部品の接触部の疲労強度に関する設計法の確立を目的とする。

3. 研究の方法

水素の影響は、環境の水素によるものと材料に侵入した水素によるものが考えられる。また、フレット疲労は摩擦・摩耗と金属疲労が同時に起こる現象であり、水素は両方に対して影響を及ぼすと考えられる。そのため水素がフレット疲労に及ぼす影響のメカニズムは、かなり複雑であることが予期される。

そのため本研究のアプローチとして、最初に水素の影響を、金属疲労とフレット疲労・摩耗のそれぞれにブレークダウンして検討し、次にそれらの相互作用について検討する方法を採った。

水素ガスと材料内水素の影響に関しては、水素を強制的に侵入させた材料（水素チャージ材）を作製し、通常材料（未チャージ材）とともに、大気中と水素ガス中でフレット疲労試験を実施した。フレット疲労・摩耗に関しては、本研究の中で明らかにした水素中特有の摩耗損傷機構を考慮して、フレット疲労強度低下に対する寄与を解明する方法を創出した。フレット疲労・摩耗試験は、大気中と水素ガス中で実施した。

金属疲労による破壊は、亀裂発生と亀裂進展の2段階を経て生じるが、フレット疲労の特色として、摩擦による応力場（摩擦力と接触応力）が直接的に支配するき裂発生が重要である。このことに着目して、フレット疲労の特殊な応力場における亀裂に対する水素の影響を解明する実験方法を開発した。

設計法を確立するためには、水素の影響下のフレット疲労強度の力学的評価が必要である。この点に関しては、有限要素法を用いた応力解析を援用したき裂発生強度評価、微小なき裂の進展／非進展の破壊力学的評価を実施した。

実験に用いた材料 供試材としてオーステナイト系ステンレス鋼 SUS304, SUS316 の溶体化処理材を用いた。化学成分を表1に、機械的性質を表2に示す。

試験片 図2にフレット疲労試験方法を示す。角棒状の疲労試験片の表裏から2個の接触片を押し当て、接触部にフレット疲労を生じさせた。接触片はブリッジ・パッドと呼ばれる形式であり、接触面間の摩擦力の測定が可能である。フレット疲労では、摩擦力は強度と直接的に関係する重要な因子である。接触面圧は100MPaとした。疲労限度は 10^7 回における非破断をもって定義した。試験環境の温度は室温とした。

試験環境 大気、水素ガスである。水素ガスの圧力は0.1MPa（ゲージ圧）とした。水素ガスは、純度99.9999%のものを用いた。

表1 供試材の化学成分

| Material | C | Si | Mn | P | S | Ni | Cr | Mo | Fe |
|----------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|------|------|
| SUS304 | 0.05 | 0.53 | 0.91 | 0.034 | 0.002 | 8.10 | 18.19 | - | Bal. |
| SUS316 | 0.04 | 0.69 | 0.98 | 0.028 | 0.006 | 10.08 | 16.78 | 2.19 | Bal. |

表2 供試材の機械的性質

| Material | Condition | Proof strength (MPa) | Ultimate tensile strength (MPa) | Elong. (%) | Reduction of area (%) |
|----------|-----------------------|----------------------|---------------------------------|------------|-----------------------|
| SUS304 | Solution heat treated | 237 | 771 | 72.3 | 81.2 |
| SUS316 | Solution heat treated | 236 | 631 | 79.4 | 85.6 |

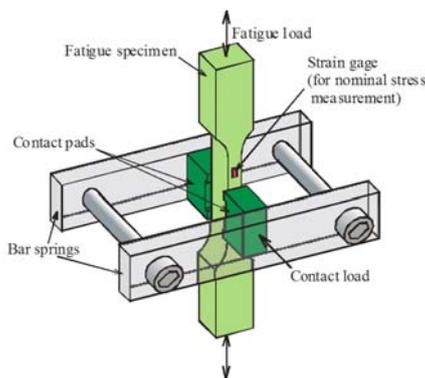


図2 フレッシング疲労試験方法

4. 研究成果

フレッシング疲労強度に及ぼす水素の影響評価 図3に結果の一例として、SUS304のフレッシング疲労強度に及ぼす水素ガスの影響と材料内水素の影響を示す。水素ガスはSUS304のフレッシング疲労強度を顕著に低下させる（○と□の比較）。材料内水素もフレッシング疲労強度を大幅に低下させる（○と●の比較）。両方の影響が同時に作用する場合に、フレッシング疲労強度はもっとも低い（■）。

図に見られるようなフレッシング疲労強度の低下は、設計上考慮が必要であり、本研究の動機となった懸念が正しいものであったことが示された。

水素がフレッシング疲労に影響を及ぼすメカニズムの解明 図4に摩擦力を測定した結果を示す。水素中では顕著に摩擦力が高い。フレッシング疲労の場合、強度は疲労の応力、摩擦による応力、接触による応力ほぼ決められる。そのため、水素中の高い摩

擦力は水素ガス中のフレッシング疲労強度低下の一因として考えられる。水素中で摩擦力が高くなるメカニズムを解明することもでき、以下に示す。

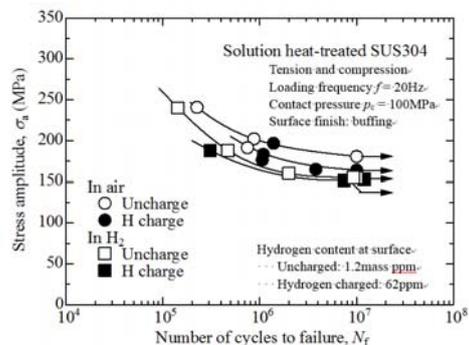


図3 SUS304 ステンレス鋼のフレッシング疲労強度に及ぼす水素の影響

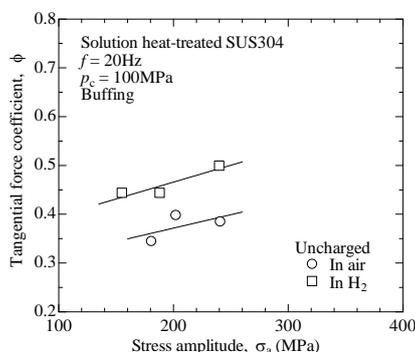


図4 フレッシング疲労の摩擦力に及ぼす水素の影響

図5に水素中フレッシング疲労試験後の試験片と接触片を示す。これらはもともと別々であったが、水素中の試験中に一体化したものである。この現象は本研究ではじめて明らかにされたものである。大気中では、酸化摩耗粉が生成され、試験片と接触片の間に介在するため、試験片と接触片が一体化することはない。フレッシングは試験片と接触片が、お互いにすべることで生じる。水素ガスでは接触片と試験片が一体化しているので、お互いをすべらそうとしたときにより大きな力（摩擦力）が必要である。

次に、なぜ水素中では試験片と接触片の一体化が生じるのかについて、原因を解明するために、図6のような観察を行った。水素中で一体化した試験片と接触片を、分解せずに軸方向に切断し、接触面を観察した。

その結果、局所的に試験片と接触片の材料に凝着が生じており、このために一体化していることが明らかになった。さらに重要なことに、凝着部分には多数の微小な亀裂が発生している。すなわち、もともと亀裂のなかった試験片に、凝着部の応力集中により、たくさんの亀裂ができて、これが水素中の顕著なフレッシング疲労強度低下の原因であると考えられる。

この「凝着が発生するとフレット疲労強度は低下する」というメカニズムを確定するために、世界的にも新しいアプローチを試みた。すなわち、大気中で凝着を起こすことができれば、凝着を起こしていない場合と強度を比較し、力学的作用を知ることができるというアイデアである。

そこでまず、大気中で凝着を起こすことにチャレンジした。極めて面の粗さが低く、かつ平面度の高い接触面を用いる(図7)ことで、大気中の凝着が実現できた。この方法でフレット疲労試験を行った結果を図8に示す。凝着を生じると大気中でもフレット疲労強度は顕著に低下し(□と○の比較)、低下した強度は水素ガス中と同等(■と●)となった。以上より、水素ガス中のフレット疲労強度低下は、凝着が一つの要因であることが明らかになった。

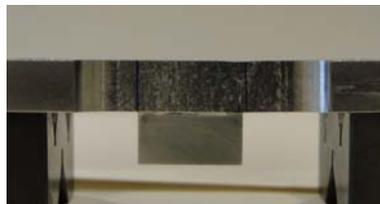


図5 水素中フレット疲労試験で生じた試験片と接触片の凝着(もともと別々であった試験片と接触片が一体化した)

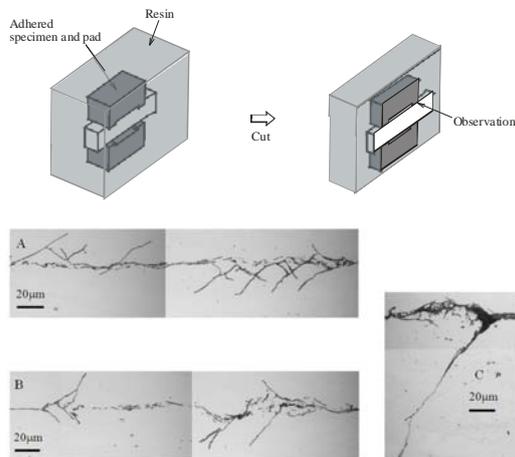


図6 水素中で生じた凝着の観察

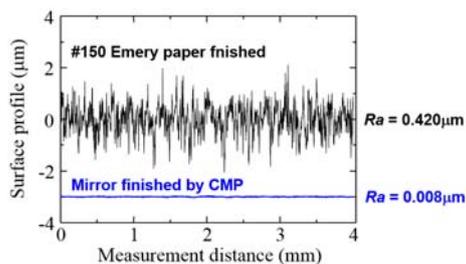


図7 大気中で凝着の再現を試みた試験片の表面の粗さ

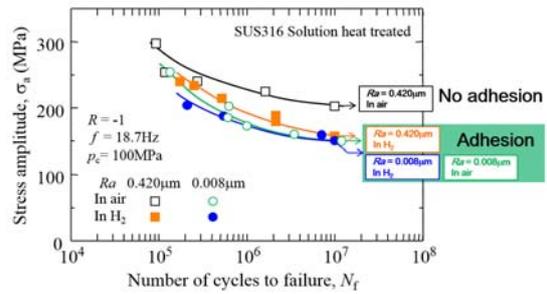


図8 凝着の力学的作用の検証実験結果

以上のような検討は、凝着による機械的応力の増加については明らかになったが、水素による本質的な影響は明らかになっていない。そのため、図9に示すような試験機を用いた新しい試験方法を開発し、水素の影響を検討した。その際、有限要素法による応力解析を実施し、結果を力学的に理解した。

検討結果の一例として、図10に凝着部に発生する亀裂の発生強度に及ぼす水素の影響を示す。ピンクの領域は亀裂がない範囲、白い領域は亀裂がある範囲である。すなわち、それらの領域の境界にあたる最大せん断応力幅が亀裂発生限界である。水素中ではこの亀裂発生限界は大気中より顕著に低い。よって、水素は亀裂発生を容易にし、これが水素中フレット疲労強度が顕著に低下した、もう一つの理由である。

図11に材料内水素によるフレット疲労強度低下の原因を明らかにした結果を示す。図は亀裂進展に及ぼす材料内水素の影響を評価したもので、材料内水素の濃度が高い場合に亀裂進展の生じる限界が低下している(矢印のついた■●と□○の比較)。

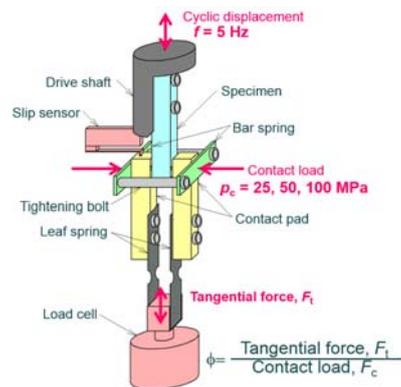
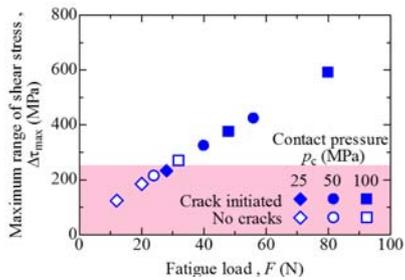
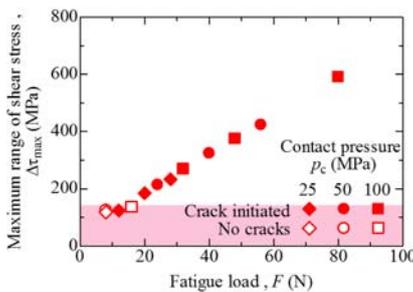


図9 水素の影響の力学的評価を目的として開発した実験方法



(a) 大気中



(b) 水素ガス中

図10 水素中フレットング下の微小亀裂発生限界

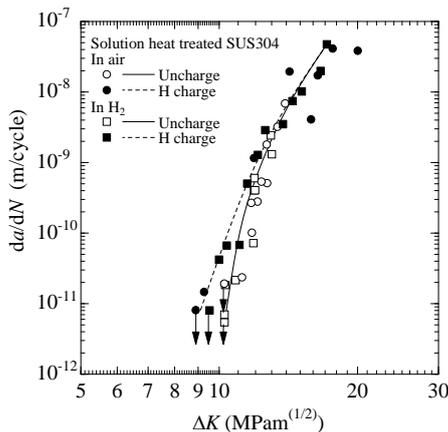


図11 亀裂進展下限界に及ぼす材料内水素の影響

水素中で使用される部品の接触部の疲労強度に関する設計法の確立 上で解明された水素中のフレットング疲労強度低下のメカニズムを考慮して、次のようなフレットング疲労強度の定量的評価モデルを提案した。接触面の微小き裂に対して最大応力拡大係数を算出し、材料の物性値である亀裂進展下限界応力拡大係数（水素によって低下）と比較を行う方法である。

疲労限度の直上の応力振幅に対して亀裂進展に伴う応力拡大係数の変化を計算すると、常に亀裂進展の下限界値の領域を超える値となっている（黒線が常に黄色の領域の上にある）これに対して、疲労限度の応力振幅に対して同様の計算を行うと、いったん亀裂は進展するが、あるき裂長さで応力拡大係数は進展下限界値以下になってしまう（青線は黄色の領域に入っている）。この場合、亀裂

は伸びないので破壊も生じない。

実験結果をこのモデルに適用して妥当性を検証し、実験結果がこのモデルにより定量的に解釈できることを確認した。以上から、水素機器の部品接触部の疲労強度の設計に対してこのモデルを適用することが可能となった。

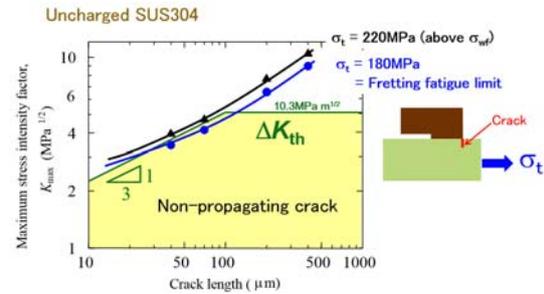


図12 フレットング疲労限度の破壊力学的評価モデル

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計 1件）

① 薦田亮介, 久保田祐信, 近藤良之, Jader Furtado, 水素ガス中フレットング疲労における疲労強度低下の基本的機構, 日本機械学会論文集A編, 査読有, 掲載許可 (2012, 発行待ち).

〔学会発表〕（計 3件）

① Koshiro Mizobe, Yuki Shiraishi, Masanobu Kubota and Yoshiyuki Kondo, Effect of Hydrogen on Fretting Fatigue Strength of SUS304 and SUS316L Austenitic Stainless Steels, The JSME/ASME 2011 International Conference on Materials and Processing (ICM&P2011), June 13-17, 2011, Corvallis, Oregon, USA.

② Masanobu Kubota, Yuki Shiraishi, Ryosuke Komoda, Yoshiyuki Kondo and Jader Furtado, Considering the Mechanisms Causing Reduction of Fretting Fatigue Strength by Hydrogen, 19th European Conference on Fracture (ECF-19), August 26-31, 2012, Kazan, Russia.

③ Ryosuke Komoda, Masanobu Kubota, Yuki Shiraishi, Yoshiyuki Kondo and Jader Furtado, The Mechanism Causing Reduction in Fretting Fatigue Strength due to Hydrogen, 7th International Symposium on Fretting Fatigue (ISFF-7), April 8-11, 2013, Oxford, UK.

〔図書〕（計 0件）

[産業財産権]

○出願状況 (計 0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況 (計 0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

久保田 祐信 (KUBOTA MASANOBU)

九州大学・工学研究院・教授

研究者番号：50284534

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：