

技術資料



Technical Data

低粘度および高 μ 油環境下における浸炭材の 疲労剥離特性

樋口成起*¹, 田中優樹*¹, 井上圭介*², 光井秀明*³, 村上靖宏*³

Fatigue Failure Characteristics of Carburized Steels Under Low Viscosity and High μ Fluids

Shigeki HIGUCHI, Yuki TANAKA, Keisuke INOUE, Hideaki MITSUI and Yasuhiro MURAKAMI

Synopsis

The automobile industry has been making various efforts to reduce fuel consumption due to CO₂ emission regulations. The viscosity of transmission fluids for gasoline engine vehicles, both automatic transmission fluid (ATF) and continuously variable transmission fluid (CVTF), has been lowered in order to improve fuel efficiency by reducing stirring resistance and increasing friction coefficient in CVTF in order to improve power transmission efficiency. On the other hand, lowering the viscosity and increasing the friction coefficient of fluids may reduce fatigue failure properties because of thinning fluid film and increasing friction force. However, the effects of these fluid property changes on fatigue failure life and its mode have not been investigated in detail, and there are many unclear points.

In this study, the fatigue failure life and its mode for SCM420H and high softening resistance steel (Daido's DEG steel for encouraging vacuum carburization of gears) were investigated using a two-roller pitting machine using ultra-low viscosity and high μ fluids. As a result, the DEG steel with high softening resistance showed longer life than SCM420H in ultra-low viscosity and high μ fluids. Furthermore, it was found that when the failure mode was pitting, the life-extending effect of DEG steel was greater.

1. 緒言

近年、環境規制を背景に自動車では、低燃費化のためにさまざまな取り組みがされている。ATFやCVTFの変速機用油剤では、攪拌抵抗低減による燃費向上を目的に、低粘度化が指向されている¹⁾。また、CVTFについては、動力伝達効率のために、摩擦係数向上(高 μ 化)も検討されている²⁾。油膜が低粘度化、高 μ 化すると油膜の薄膜化や摩擦力の増大が生じるため、浸炭部品に対

しては、疲労剥離寿命への跳ね返りが懸念される。しかしながら、低粘度、高 μ 油における疲労剥離寿命や損傷形態については、具体的に調査されておらず、不明確な部分が多い。

歯車やプーリーにおける、面圧による疲労剥離損傷の一つがピッチングである。ピッチング抑制には、粗さ低減³⁾やショットピーニングによる圧縮残留応力付与⁴⁾、さらに高軟化抵抗鋼の適用⁵⁾などが有効であることが報告されている。高軟化抵抗鋼の適用は、直接的には接

2020年5月15日 受付

* 1 大同特殊鋼(株)技術開発研究所 (Corporate Research & Development Center, Daido Steel Co., Ltd.)

* 2 大同特殊鋼(株)ソリューションパートナー部 (Solutions Partner Dept., Daido Steel Co., Ltd.)

* 3 アフトンケミカル・ジャパン(株) (Afton Chemical Japan Corporation)

触面の軟化抑制によるものであるが、現在指向されている低粘度油、高 μ 油においてその有効性は調査されていない。

以上、本研究では、汎用鋼と高軟化抵抗鋼の低粘度油、高 μ 油下での疲労剥離寿命、および破損形態について、ローラーピッチング試験（以下、RP試験）により調査するとともに、これら剥離寿命に対する、高軟化抵抗鋼の有効性について明らかにした。

2. 実験方法

2. 1 供試材

本研究で用いた鋼材の化学成分を Table 1 に示す。汎用鋼は、JIS-SCM420H を用い、高軟化抵抗鋼は、大同特殊鋼(株)が開発した真空浸炭用高軟化抵抗鋼⁶⁾（以下、DEG鋼）を用いた。本 DEG 鋼は、Si、Mn、Cr などの主要添加元素を調整することで、真空浸炭特有のエッジ過剰浸炭を抑制しつつ高い軟化抵抗性が得られるものである。

Table 1. Chemical composition (mass%).

| Material | C | Si | Mn | Cr | Mo | Fe |
|---------------------------------|------|------|------|------|------|------|
| SCM420H | 0.20 | 0.20 | 0.72 | 0.99 | 0.15 | Bal. |
| High softening resistance steel | 0.20 | Add. | | | | Bal. |

これら鋼材は、150 kg の真空誘導炉で溶製し、その後、熱間鍛造により $\phi 32$ mm の棒鋼に鍛伸した。この棒鋼に950℃の焼ならし処理を施した後、機械加工によって $\phi 26.3$ mm \times 130 mm の RP 試験片（駆動ローラー）を作製した。続いて950℃での真空浸炭処理（ModulTherm[®]、大同特殊鋼(株)製）を実施した後、油焼入れ、焼戻し（180℃ \times 7.2 ks）を行った。焼戻し後の RP 試験片は、試験部（転走面）の面粗さを揃えるため、片肉150 μ m の研磨を行い、転走面の直径を $\phi 26.0$ mm、粗さを Ra \approx 0.14 μ m に仕上げた。Table 2 には、RP 試験片の浸炭品質を示す。SCM420H、DEG 鋼ともに、表層硬さは約700 HVであった。また、Fig. 1 には、浸炭後の RP 試験片を275~350℃で2 h 焼戻した後の表層硬さを示す。DEG 鋼は、いずれの焼戻し温度においても SCM420H 対比、硬さが高く、高い軟化抵抗性が得られていた。

Table 3 に本研究で用いた3種の油剤（Fluid A~C）の諸特性を示す。これらはいずれも動粘度（Kv100）で7 mm²/s 以下であり、低粘度に位置付けられる油剤であ

る。Fluid A は、汎用的な低粘度油であり、Fluid B は、Fluid A よりもさらに低粘度なものである。Fluid C は、Fluid A とほぼ同等粘度で、摩擦係数 μ が高位なものである。なお、Fluid B、C については、Fluid A よりも添加剤成分が多い。この添加剤成分増量の役割は、摩耗を抑制することであるが、その直接的な摩耗抑制効果は、部材表面と添加剤成分との化学反応で形成されるトライボフィルム（添加剤皮膜）がより厚くかつ硬く形成されることによる^{1), 2)}。Fig. 2 には、トライボフィルム厚さの違いの一例として、Fluid A、B におけるブロックオンリング摩擦試験（ASTM D2714）後の試験片表面のオージェ電子分光法の結果を示す。鉄成分が低位となっている部分がトライボフィルムに相当する。本図から、トライボフィルム厚さは、Fluid A で約20 nm、Fluid B で約80 nm であり、添加剤成分の多い Fluid B の方がより厚いトライボフィルムが形成させていることが分かる。

Table 2. Roughness, carburizing, hardness and microstructure of RP specimen.

| | SCM420H | High softening resistance steel (DEG series) |
|--------------------------|----------------------------------|--|
| Ra / Rz [μ m] | 0.135 / 1.143 | 0.138 / 1.292 |
| Carburizing [wt.%] | 0.65 | 0.71 |
| Hardness at 0.05 mm [HV] | 701 | 709 |
| Microstructure | Martensite (+retained γ) | Martensite (+retained γ) |
| Retained γ [%] | 24.2 | 28.7 |
| ECD at 513 HV depth [mm] | 1.28 | 1.26 |

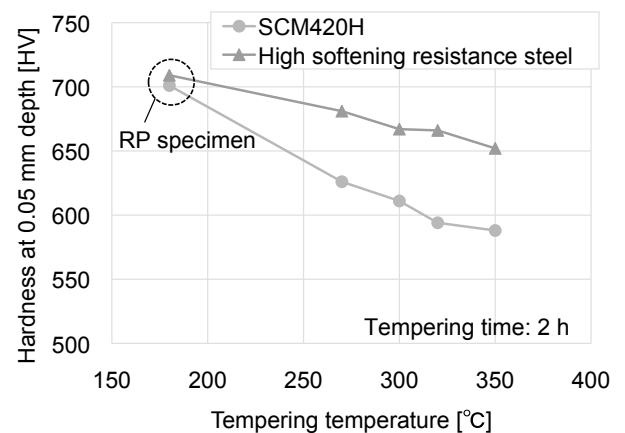


Fig. 1. Hardness at 0.05 mm depth in RP specimens after tempering at 275~350 °C for 2 h.

Table 3. Properties of fluids used in the testing.

| | Fluid A (low viscosity) | Fluid B (ultra low viscosity) | Fluid C (high μ) |
|--|----------------------------|----------------------------------|---------------------|
| Kv100 [mm ² /s] | 5.8 | 4.2 | 6.2 |
| Kv40 [mm ² /s] | 26.3 | 18.3 | 26.0 |
| Viscosity Index | 166 | 132 | 200 |
| Metal on metal friction 0.125 m/s (JASO M358) | 0.117 | 0.118 | 0.125 |
| Additive element [ppm] | P | 310 | 309 |
| | S | 730 | 1000 |
| | Ca | 110 | 296 |
| | B | 70 | 142 |

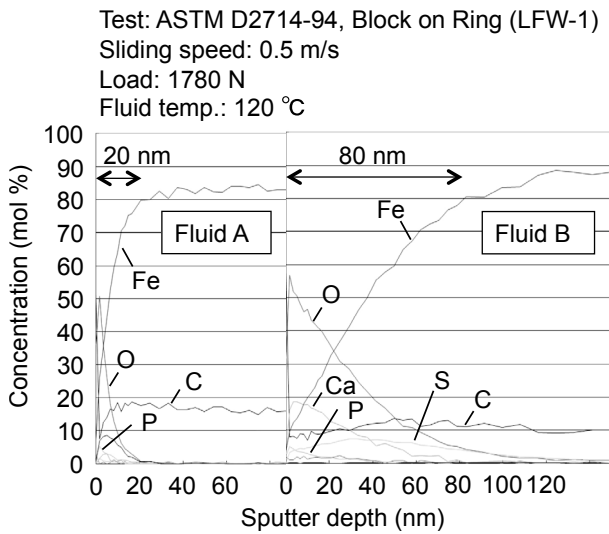


Fig. 2. Concentration profile of elements determined by auger electron spectroscopy.

2. 2 RP 試験方法

疲労剥離寿命および損傷形態の評価には、(株)ニッコークリエート製の RP 試験機を用いた。RP 試験は、Fig. 3 に示すように、駆動ローラーと従動ローラーを一定面圧で接触させ、油潤滑環境下ですべりを与えながら回転させることで駆動ローラーに疲労剥離を生じさせる試験である。Table 4 に試験条件を示す。条件は一律とし、面圧 3 GPa、すべり速度 -1.22 m/s、油温 90 °C にて行った。また、試験数は各条件 n=2 とし、疲労剥離寿命は、振動検出により試験機が停止した cycle 数とした。なお、損傷形態は、損傷部の断面ミクロ観察により同定した。

3. RP 試験結果

Table 5 に汎用鋼 SCM420H と高軟化抵抗鋼“DEG 鋼”の疲労剥離寿命と損傷形態を示す。また、Fig. 4 には、

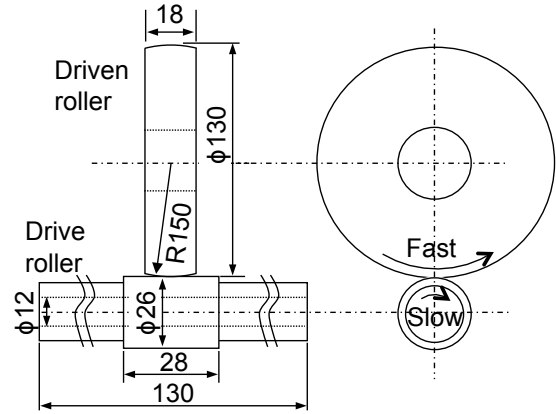


Fig. 3. Schematic diagram of RP testing.

Table 4. Condition of RP testing.

| | | Test condition |
|---------------------------------|------------------|----------------------------|
| Drive roller (specimen) | | φ26 |
| Driven roller (SUJ2 61 ± 1 HRC) | | φ130 (R150) |
| Drive roller | Rev. [rpm] | 1500 |
| | Slip ratio [%] | -60 |
| | Slip speed [m/s] | -1.22 |
| Maximum hertzian pressure [GPa] | | 3.0 |
| Fluid temp. [°C] | | 90 (Flow rate: 2 L/min) |

疲労剥離寿命の各 n=2 の平均値を示している。Table 5 に示すように、今回の RP 試験では、表面起点のピッチング破壊とき裂周辺に白色組織（ホワイトバンド）を伴った水素脆化型破壊（以下、WB 破壊）の 2 種の破壊形態が認められた。Fig. 5 には、疲労剥離部の断面ミクロ組織の代表例を示す。WB 破壊では、表層より数百 μm 位置において、き裂に沿った白色組織が観察された。また、Fig. 6 には、疲労剥離部の外観写真の代表例を示す。ピッチング破壊では矢尻型の剥離を呈しているのに対し、WB 破壊では矩形の剥離を呈していた。各油剤における損傷形態について言及すると、汎用の低粘度油である Fluid A では SCM420H、DEG 鋼ともに WB 破壊が認められたのに対し、さらに低粘度な Fluid B および高 μ な Fluid C では、WB 破壊は認められず、全てピッチング破壊であった。なお、ピッチング破壊寿命は、Fluid B、C ともに、DEG 鋼の方が長寿命であった。

4. 考 察

4. 1 疲労剥離寿命、損傷形態への油剤の影響

各油剤における疲労剥離寿命の優劣は、SCM420H、DEG 鋼ともに、Fluid A << Fluid B < Fluid C となった。本節では、この序列の要因について考察する。

Table 5. Fatigue life and failure mode.

| | | SCM420H | | High softening resistance steel | |
|---------|-----|-------------------------------------|--------------|-------------------------------------|--------------|
| | | Fatigue life ($\times 10^5$ cycle) | Fatigue mode | Fatigue life ($\times 10^5$ cycle) | Fatigue mode |
| Fluid A | N=1 | 2.3 | Pitting | 3.0 | WB |
| | N=2 | 3.4 | WB | 3.8 | WB |
| Fluid B | N=1 | 13.7 | Pitting | 39.7 | Pitting |
| | N=2 | 20.3 | Pitting | 37.6 | Pitting |
| Fluid C | N=1 | 28.3 | Pitting | >100 | - |
| | N=2 | >100 | - | >100 | - |

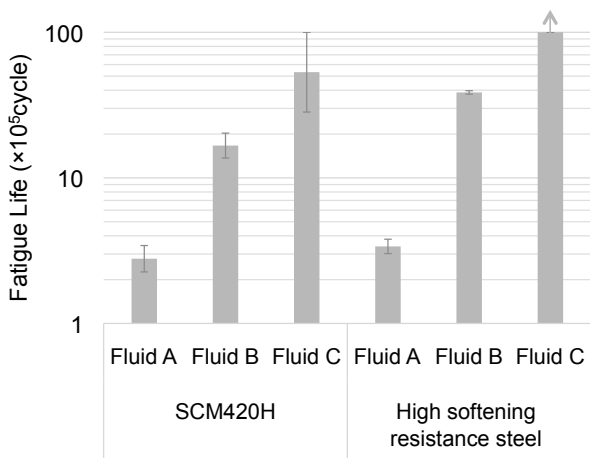
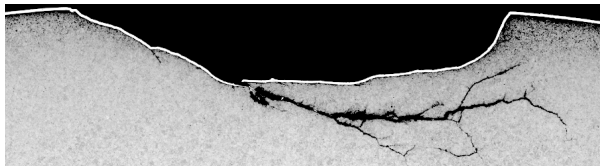


Fig. 4. Fatigue life of RP specimen.

★Pitting (surface failure)



★White band (internal failure)

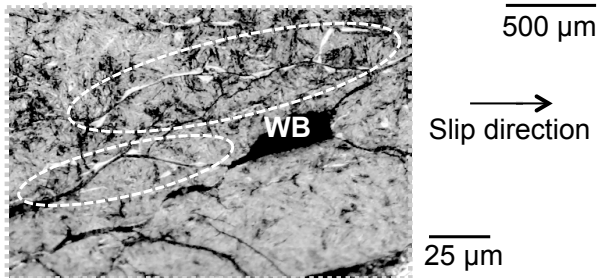
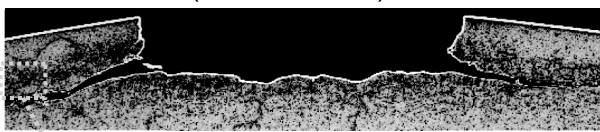


Fig. 5. Example of microstructure at cross section of RP specimen.

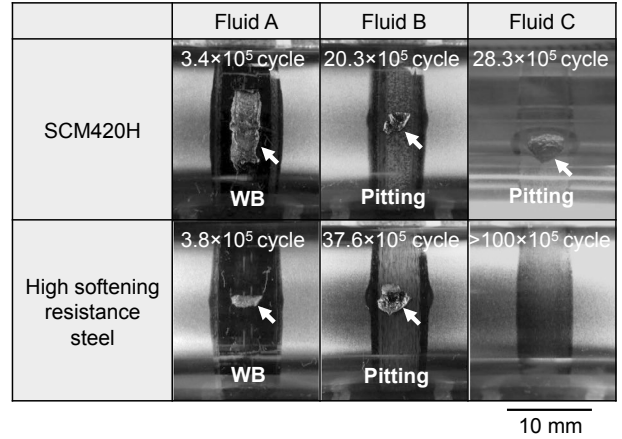


Fig. 6. Photographs of RP specimen after failure.

まず、最も短寿命となった Fluid A に関し考察する。Fluid A が最も短寿命になった要因は、ピッチング破壊に至る前に、早期に WB 破壊が発生したことによると思われる。そのため、Fluid A での短寿命化の要因については、WB 破壊のメカニズムに着眼し考察する。WB 破壊は、すべりを伴う環境の場合、摩耗で露出した新生面と油剤とのトライボケミカル反応により発生した水素が、鋼中に侵入することで起こると考えられている^{7), 8)}。さらに、転走面の摩耗量に応じ、侵入水素量が多くなることも報告されている⁹⁾。これら知見より、今回の RP 試験においても、摩耗量に応じて侵入水素量が変化し、損傷形態が異なった可能性が考えられる。Fig. 7 に転走面の摩耗速度について、各 n=2 の平均値を示す。ここでの摩耗速度は、試験後の試験片において、剥離していない箇所の最大摩耗量を試験時間で除した値とした。Fig. 7 に示すように、SCM420H, DEG 鋼ともに、Fluid A の摩耗速度は、Fluid B, C よりも著しく速いことが分かる。つまり、Fluid A でのみ WB 破壊が起きたのは、摩耗速度が速いため、より多くの水素が発生、侵入したことによると思われる。なお、Fluid A において、摩耗速度が速かったのは、Fluid B, C よりも添加剤成分量が少ないことにより、形成されるトライボフィルムが薄くかつ軟質だったためと推察される。

次に、ピッチング破壊となった Fluid B, C について、Fluid C の方が長寿命であった要因について考察する。RP 試験におけるピッチング寿命は、面圧、滑り速度、摩擦係数 μ の他、鋼材中の残留応力、軟化抵抗性など、多くの因子に影響されるが、油剤の違いにより差異が生じる因子は摩擦係数 μ である。そして、摩擦係数 μ は接触面の潤滑状態に依存する。通常、潤滑状態が悪いと摩擦係数 μ は大きくなるため、接触面での摩擦力や発熱量が増大し、疲労剥離寿命も短くなる。Fluid B, C

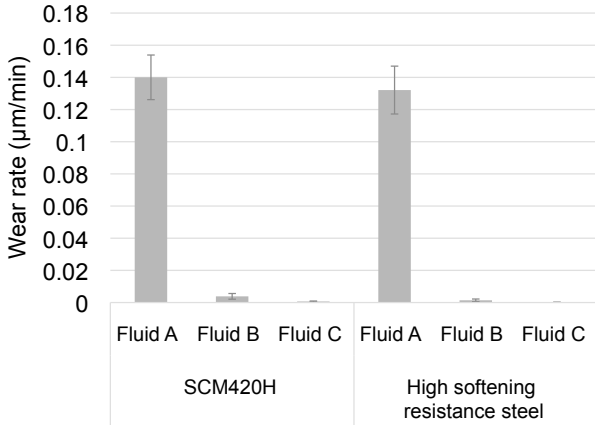


Fig. 7. Wear rate of each fluid.

の寿命差の要因については、この潤滑状態に着眼し考察する。今回、潤滑状態を示す指標として、式(1)に示される膜厚比λ値を用いた¹⁰⁾。このλ値は、最小油膜厚さ h_{min} と試験片両面の合成表面粗さ $(Rq_1^2+Rq_2^2)^{1/2}$ の比で表され、このλ値が小さい程、潤滑状態が悪く、すなわち摩擦係数 μ も大きくなることを意味する。Fig. 8にFluid A～Cにおけるλ値を示す。ここでの最小油膜厚さは、式(2)に示す弾性流体潤滑(EHL: Elasto-Hydrodynamic Lubrication)下における膜厚計算式¹¹⁾を用い、合成粗さは、試験前の値を用いた。

$$\lambda = h_{min} / \sqrt{Rq_1^2 + Rq_2^2} \quad (1)$$

$$h_{min} = 3.68 \times U^{0.68} \times G^{0.49} \times W^{-0.073} \times (1 - e^{-0.67k}) \quad (2)$$

速度パラメータ: $U = \eta^0 \times u \times / (E \times R_x)$ η^0 : 大気圧下の粘度

荷重パラメータ: $W = w / (E \times R_x^2)$ u : 平均速度

材料パラメータ: $G = \alpha \times E$ E : 等価弾性係数

R_x : 等価曲率半径

w : 荷重

α : 粘土圧力係数

Fig. 8に示すように、Fluid Cの方がFluid Bよりもλ値は大きく、転走面における潤滑状態は良かったことが分かる。つまり、Fluid Cの方が長寿命であった要因は、潤滑状態が良かったことで、摩擦係数 μ がより小さくなったことによると推察される。なお、ブロックオンリング摩擦試験で評価したTable 3の摩擦係数は、Fluid Cの方が大きい値となっており、上記記述とは矛盾する。これは、ブロックオンリング摩擦試験がRP試験と異なる潤滑状態(評価λ域が異なる)での評価だったためと推察され、今回のRP試験における摩擦係数 μ は、上述の通り、Fluid Cの方が小さかったと考えられる。

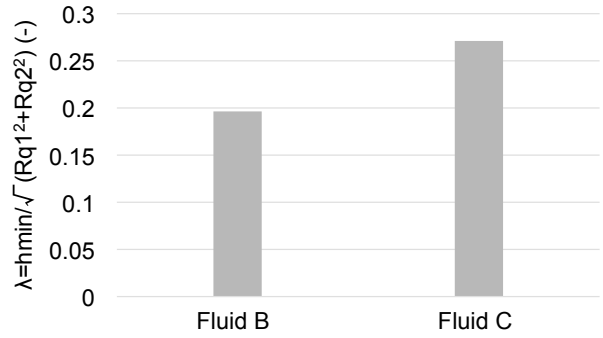


Fig. 8. λ value of each fluid.

4. 2 高軟化抵抗鋼(DEG鋼)における疲労剥離寿命向上の要因

Fluid B, Cにおいて、高軟化抵抗鋼はピッチング寿命向上に非常に有効であることが分かった。ここでは、その寿命向上要因について考察する。ピッチング破壊の素過程は、まず数十μmの微小亀裂が発生し、その亀裂が進展することで剥離に至ると考えられている¹²⁾。Fig. 9には、その素過程の模式図を示しているが、ここでは、初期段階である、微小亀裂生成に着眼し考察する。Fig. 10には、Fluid B, Cにおける試験後の剥離損傷していない転走面のSEM像を示す。SCM420Hでは、Fluid B, Cともに、数十μm幅の微小亀裂が多数発生しているのに対し、DEG鋼ではほとんど発生していなかった。本結果から、Fluid B, CにおけるDEG鋼の寿命向上は、初期段階での微小亀裂抑制が一因であると考えられる。なお、それらの抑制は摩擦抑制と同様に、高軟化抵抗に起因したものと考えられる。Fig. 11に転走面表層の軟化速度について、各n=2の平均値を示す。ここでの軟化速度は、試験後の試験片において、剥離していない箇所の表層から0.05μm位置硬さを試験時間で除した値とした。Fig. 11に示すように、実際にDEG鋼の方が表層硬さは高く保たれており、これが初期亀裂生成の抑制に寄与したと考えられる。なお、DEG鋼の寿命向上要因としては、ピッチング破壊の素過程で考えると、き裂進展速度が遅くなったことによる可能性も考えられるが、この要因有無の解析については、今後の課題としたい。

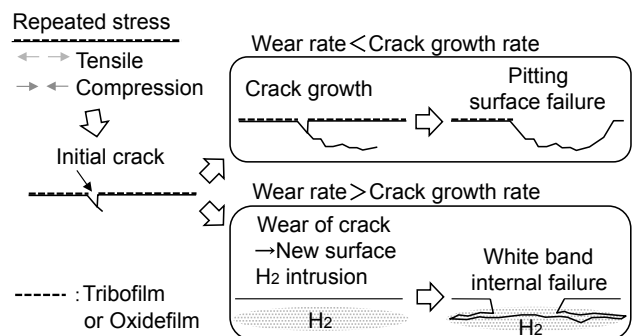


Fig. 9. Schematic illustration of failure process in RP testing.

| | Fluid B | Fluid C |
|---------------------------------|----------------------------|---------------------------|
| SCM420H | 20.3×10 ⁵ cycle | 100×10 ⁵ cycle |
| High softening resistance steel | 37.6×10 ⁵ cycle | 100×10 ⁵ cycle |

400 μm

Fig. 10. SEM images of rolling surface after failure.

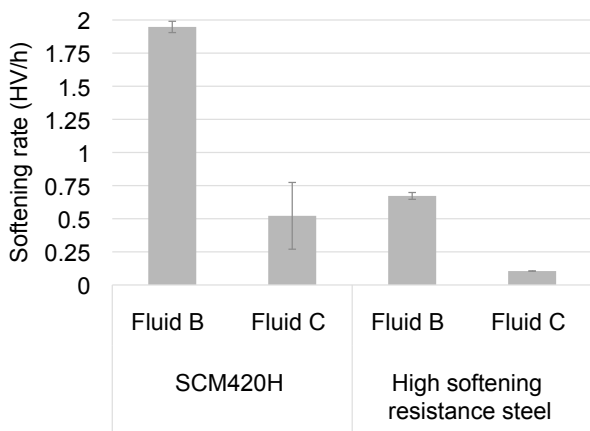


Fig. 11. Softening rate in RP testing.

5. 結 言

RP試験機を用いて、汎用鋼 SCM420H と高軟化抵抗鋼“DEG 鋼”の低粘度油、高μ油における疲労剥離寿命および破損形態を調査した。

1. 汎用の低粘度油“Fluid A”では、SCM420H、DEG 鋼ともに、WB破壊が認められ、さらに低粘度な“Fluid B”および高μである“Fluid C”については、SCM420H、DEG 鋼ともに、WB破壊は認められず、全てピッチング破壊であった。
2. また、ピッチング破壊となった Fluid B、Cについては、DEG 鋼の方が長寿命であった。DEG 鋼の寿命向上要因は、微小亀裂生成抑制がその一要因であると考えられる。
3. 各油剤における疲労剥離寿命の優劣は、両鋼材ともに、Fluid A << Fluid B < Fluid C の順であった。Fluid A が最も短寿命であったのは、WB破壊の発生による。なお、Fluid A でのみ WB破壊が発生したの

は、添加剤分量が少ないために、摩耗速度が著しく速かったことによると考えられる。さらに、Fluid B よりも Fluid C の方が長寿命であったのは、Fluid C の方が、転送面における潤滑状態が良く、その結果、摩擦係数 μ もより小さくなったためと考えられる。

(文 献)

- 1) 村上靖宏：トライボロジー会議 2018 秋，(2018)。
- 2) 成田恵一：トライボロジスト，63(2018)，8，526。
- 3) 中西勉，有浦泰常，上野拓：日本機械学会論文集，52(1986)，477，1649。
- 4) 橋本宗到：ショットピーニング技術，4(1993)，3，101。
- 5) 石倉亮平，井上圭介，小林祐次，辻俊哉：電気製鋼，81(2010)，99。
- 6) 秦野敦臣：電気製鋼，80(2009)，77。
- 7) 川村隆之：NTN TECHNICAL REVIEW，85(2017)，84。
- 8) 森誠之，七尾英考：表面科学，19(1998)，6，379。
- 9) M. KOHARA, T. Kawamura, M. Egami: Study on Mechanism of Hydrogen Generation from Lubricants, Tribology Transactions, 49(2006)，53。
- 10) 兼田楨宏：日本機械学会論文集，74(2008)，1931。
- 11) 杉村丈一：トライボロジスト，49(2004)，10，799。
- 12) 海藤広峻，川元康裕，太田順子，中島亮，長藤圭介，七野勇人，中尾政之，濱口哲也：日本機械学会論文集 C 編，77(2011)，773，187。



樋口成起



田中優樹



井上圭介



光井秀明



村上靖宏