

モデル摩擦試験によるウォームギヤの損傷要因分析

Analysis of damage factors in worm gears through model friction tests

福井大・工（正）*辻 怜志 福井大・工（正）本田 知己 福井大・工（正）今 智彦

Reiji Tsuji*, Tomomi Honda*, Tomohiko Kon*

*University of Fukui

1. 緒言

近年、多くの工場で機械設備が無駄なく生産実績を上げることができるよう TPM（Total Production Maintenance：総合生産保全）活動が行われている。これは、生産機械設備の損傷兆候を早い段階で発見して損傷の発生を未然に予防するだけでなく、設備効率における損失をなくすことを目的とする。この損失の中でも故障ロスが注目されている。故障ロスとは、機械要素の損傷により修理を行わなければ生産活動ができない事態を招き、機械が正常に稼働していれば得られたであろう価値が損なわれる損失のことである。機械設備は多数の機械要素から構成されており、それらの機能劣化が原因となり故障に至る。すなわち機械設備に発生する損傷のほとんどは機械要素の摩耗によるものである。そのため、機械要素における摩耗抑制のためのトライボ設計が求められている。

機械要素の中でも、ウォームギヤの摩耗に注目した。ウォームギヤの摩耗における先行研究として、Raadnui は酸腐食や湿気腐食、粒子混入下など様々な潤滑条件におけるウォームギヤの摩耗形態や摩耗量を明らかにしている⁽¹⁾。また、Milan opalic らは、ウォームホイールに形成されるピッチングにはウォームギヤの伝達誤差が大きく影響を与えていると報告している⁽²⁾。このようにウォームギヤで発生する摩耗形態について言及しているが、これらの摩耗現象がウォームギヤの故障に与える影響について調べた研究は多くない。

ウォームギヤにおけるトライボ設計を行うためには、どの摩耗現象がウォームギヤの故障に影響を与えるのか、また、その摩耗現象の発生メカニズムを明らかにすることが重要となる。そこで、本研究では、実機ウォームギヤの歯面の観察を行うことで、ウォームギヤにおける摩耗現象を特定し、ウォームギヤにおける摩耗メカニズムおよびウォームギヤの故障要因について検討した。

2. 観察試料および試料作製

観察した実機ウォームギヤの運転条件を Table 1 に示す。運転サイクルは、ウォームギヤを 56 秒正転させた後、10 秒停止させ、その後 56 秒逆転させ再び 10 秒停止する過程を 1 サイクルとした。潤滑剤には、グリース（ちょう度番号：No. 0、滴点 290℃）を用いた。また、ウォームには SCM420H（クロモリブデン鋼）を、ウォームホイールに CAC304（高力黄銅）を用いた。観察試料はより損傷の大きいウォームホイールとし、マイクロカッターを用いてウォームホイールから切り出し、その後アセトンによって超音波洗浄を 5 分間行った。

Table 1 Operating conditions of test sample

Pressure [MPa]	Sliding velocity [m/s]	Lubricant	Material	Brinell Hardness	Operating cycle
88	1.5	Grease	SCM42H/CAC304	237	3269

3. 観察結果

3.1 歯元観察結果

ウォームホイールの歯元を電子顕微鏡によって観察した結果、摺動方向に被膜が形成されていることが確認された。観察された被膜をエネルギー分散型 X 線分光法により元素分析を行った結果を Fig. 1 に示す。ウォームホイールの歯元の被膜の部分からアルミニウムや酸素、硫黄が多く検出された。また、酸素に着目すると被膜の部分ではアルミニウムの検出場所とよく一致していることがわかる。このことから、ウォームホイールの歯元部分で観察された被膜はアルミニウムの酸化膜であると考えられる。このような酸化膜が形成された要因としては、摩耗粉の関与が推察される。先行研究において、なじみ過程の初期段階に生成されたシビア摩耗粒子が酸素に富んだマイルド摩耗粉を生成し、それらが摩擦によって摩擦面に固着され、マイルド摩耗面を形成する。またその過程において摩耗粉は酸化物として摩擦面への酸素の運び役となることが報告されている⁽³⁾。このことから、ウォームホイール摺動面の酸化膜はなじみ過程で形成されたものであると考察した。

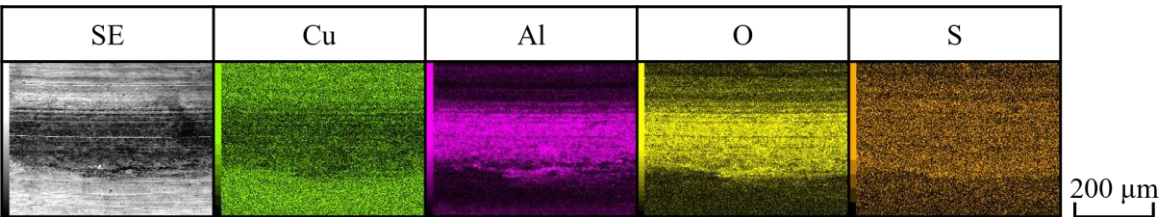


Fig. 1 SE image and EDX mapping of surface film of worm wheel

この仮説通り、摩耗粉が酸化膜の形成に寄与している場合、相手側であるウォーム側にも同様に摩耗粉が移着し、同様の酸化膜が観察できると考えた。そこで同様にウォームをマイクロカッターで切断し、ウォーム歯面を観察した。ウォーム歯面の元素分析結果を Fig. 2 示す。ウォーム歯面から、摺動方向に被膜が見られ、その部分ではアルミニウムと酸素が同一箇所で見出されるという、ウォームホイールの被膜と同様の分析結果となった。この結果から、観察された酸化膜は、仮説通りなじみ過程に酸素に富む摩耗粉が摩擦面に固着し、酸素の運び役となって形成されたものであると推察した。

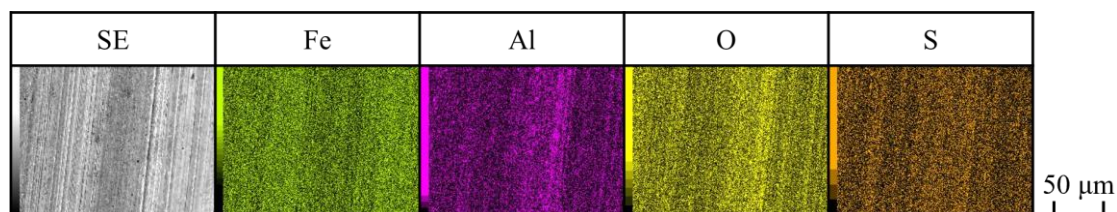


Fig. 2 SE image and EDX mapping of surface film of worm

3.2 歯先観察結果

Figure 3 にウォームホイールの歯の欠損部の二次電子像を示す。これらの歯の欠損は、転がり疲労による損傷であると推察される。ピッチングやフレーキングなどの転がり疲労損傷が起きている場合、一般的に 100 μm 以上の平板状摩耗粒子が観察されるため、損傷形態の確認のために摩耗粒子観察を行った。Figure 4 に示される通り、粒径 200 μm の平板状摩耗粒子が観察された。この特徴から、観察された摩耗粒子は疲労摩耗粒子であると考えられる。これらの観察結果から、Fig. 3 の歯の欠損は、歯車や転がり軸受などによく見られる転がり疲労損傷によるものであると考察した。

転がり疲労の損傷形態は、表面起点型と内部起点型に大別でき、それぞれ発生する要因が異なる。まず、内部起点型転がり疲労は、転がり接触により表面下に発生する最大せん断応力に起因する。次に、表面起点型の転がり疲労は、異物の噛みこみで形成された圧痕が起点となる損傷が代表的である。このような起点を特定するために改めて歯先を観察した。Figure 5 に示される通り、ウォームホイールの歯先で異物が噛みこんだ圧痕が生じていた。観察結果から、ウォームホイールの歯の欠損は異物の噛みこみによる表面起点型転がり疲労によるものであると考察した。

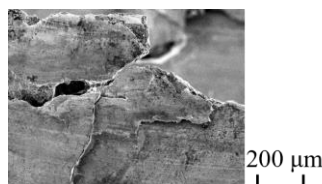


Fig. 3 Tooth fracture of worm wheel

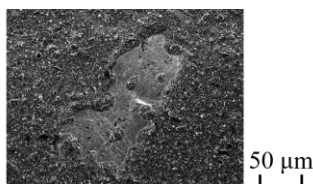


Fig. 4 Fatigue wear particle

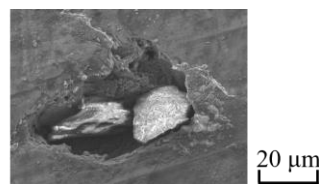


Fig. 5 Indentation at tooth addendum

4. ウォームギヤの故障要因

ウォームホイールの歯元に形成された酸化膜はなじみ過程に形成され、耐摩耗性の向上に寄与する。そのため、歯元の現象ではウォームギヤの故障まで至らないと推察される。一方、ウォームギヤの応力解析⁽⁴⁾から、歯先にて応力集中が生じることが多いため、歯先の転がり疲労がウォームギヤの故障要因となる損傷であると推察した。

今回の観察結果をもとにウォームギヤの接触状態を模擬した摩擦試験を行い、歯先および歯元の摩耗現象メカニズムを明らかにすることでウォームギヤの故障要因について検討する。

5. 結言

実機環境で使用されたウォームギヤの摩耗面を電子顕微鏡で観察し、エネルギー分散型 X 線分光法で元素分析を行った結果、以下の結言を得た。

- (1) ウォームホイールの歯元部分には摺動方向にアルミニウムの酸化膜が形成され、ウォーム歯面からも同様の分析結果が得られたことから、酸化膜は酸化した摩耗粉が固着することによって形成されたと推察した。
- (2) ウォームホイールの歯先では歯の欠損が生じており、圧痕が観察されたことから、表面起点型の転がり疲労損傷が起きていると推察した。
- (3) 歯先で起きる転がり疲労がウォームギヤの故障要因となる損傷であると考察した。

参考文献

- (1) Surapol Raadnui : Wear, 476 (2021) 1-14
- (2) Milan opalic : Wear, 332-333 (2015) 1145-1150
- (3) 平塚健一 : 日本機械学会論文集, 58, 555, (1992) 3362
- (4) Daizhong Su : Journal of Materials Processing Technology, 138 (2003) 429-435