

技術論文

歯車における白色組織を伴う歯面剥離について

Gear Tooth Flank Flaking Associated with White Etching Area

七野 勇人
Hayato Shichino
苅 和 慎 平
Shinpei Kariwa
木 村 広 人
Hiroto Kimura

建設機械のパワートレインで使用される歯車（円筒歯車およびベベルギヤ）のベンチ加速試験において、近年、早期に歯面が損傷する事例が散発している。損傷した歯面には、白色組織（白層）を伴う内部き裂が発生しており“歯車の白層剥離”という新たな損傷モードとして認識され始めている。また、市場で正常に稼動している歯車ではこの様な白層剥離は報告されておらず、歯車の白層剥離はベンチ試験特有の現象と考えられ、その発生原因は明確になっていない。一方、白層剥離はベアリングの転動疲労で多数報告されており、類似した現象と考えられる。そのためベアリングの白層剥離を参考として、歯車における白層剥離の解決を目指し、白色組織の調査、発生メカニズムの検討および歯車に於ける要因の影響を検討した。

Cases of rapid tooth flank damage have recently been sporadically appearing in assembly tests of gears (cylindrical gears and bevel gears) used in construction machinery powertrains. The damage to the tooth flanks has started to be recognized as a new failure mode (called gear flaking with white etching area) in which internal cracks form that are associated with white structure (white etching area). Since gear flaking with white etching area has not been reported in gears operating normally in the market, it is considered to be a phenomenon unique to assembly testing. Its cause has not been explicated. However, it is frequently reported in cases of bearing rolling contact fatigue, which are considered a similar phenomenon. So using the flaking with white etching area found in bearings as a reference, we have aimed to find a solution to the flaking with white etching area found in gears by examining white etching area, studying the generation mechanism and studying the effects of causes in gears.

Key Words: 歯車, 歯面損傷, 転動疲労, 白色組織, 白層剥離, 水素脆性

1. はじめに

建設機械のパワートレインには、多くの歯車が用いられており、その耐久性を評価するためにファイナルドライブやアクスルなどのコンポーネントの状態で負荷を上げて連続で稼動する加速試験を行っている。このベンチ加速試験において、近年、歯車の歯面が早期に大きく剥離してしまう損傷が円筒歯車およびベベルギヤで散発している。設計上は従来の強度基準を満足しており、また、製造上の変更もないことから、この早期に損傷する原因は見当たらず、その発生原因を特定することができなかった。

一方、ベアリングの転動疲労に於いては、白色組織を伴う剥離がこれまでに多く報告^{[1][2]}されており、今回の歯車の損傷形態はベアリングの白層剥離と共通する所が多い。ベアリングの白層剥離は、摺動表面でのオイルの分解によって発生した水素が鋼中に侵入した水素脆性に

より、白色組織および内部き裂が生じる水素脆性説^{[3][4]}が有力と考えられている。そこで、歯車の白層剥離の現象を理解し解決策を検討するために、白色組織の調査、発生メカニズムの検討、歯車に於ける摺動および水素脆性に影響を及ぼすと考えられる要因の影響を基礎試験で評価したので報告する。

2. 白層剥離の特徴とメカニズム

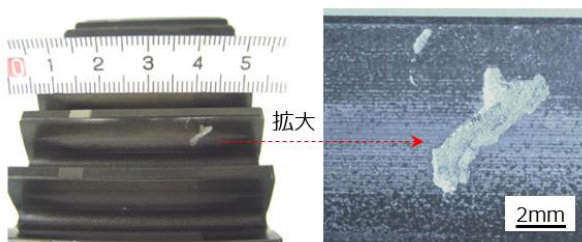
2.1. 白層剥離の特徴

ベンチ試験で発生した白色組織を伴う歯面剥離の事例を図1に示す。歯車の歯面損傷としては、表面を起点とするピッチング損傷が一般的だが、白色組織を伴う剥離は、図1(a)に示すように目視ではピッチング損傷と明確な区別が付きづらい形態をしている。剥離の起点を確認するため、同じ歯車で小さな剥離が発生している箇所を調べると、図1(b)に示す様に破面の中央付近にある円盤

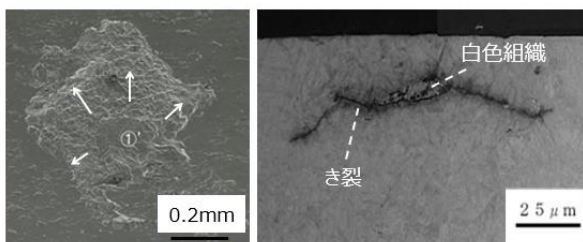
状の面からき裂が進展して剥離に至っていることが確認された。さらに剥離していない歯の断面を調査した結果、**図 1 (c)** に示すように内部に白色組織とき裂が発生しているのが複数確認され、内部に発生した白色組織を起点とした剥離（白層を伴う歯面剥離）であることがわかった。同様に、複数の歯車で白色組織およびき裂を調査した結果、以下の特徴が挙げられる。

- ・ 歯車の白色組織の多くは深さ $40\ \mu\text{m}$ 以下の表層近くに発生しており、ベアリングで発生している深さ（ 100 から $300\ \mu\text{m}$ ）に比べて浅い。
- ・ 歯車では非金属介在物を起点に白色組織が生成している事例が認められる。

次に歯車の白色組織の調査を TEM で行った。結晶構造を調べた結果、**図 2 (a)** に示す様にハローパターンを示しており、bcc の結晶構造（フェライト組織）の周期を持った超微細結晶と考えられる。比較のためベアリングの白色組織の結果も合わせて示しているが、同じ結晶構造であることが確認された。さらに、組織写真を**図 2 (c)** に示すが、 10 から $20\ \text{nm}$ の等軸晶であった。また、硬さをマイクロビッカースで計測した結果、浸炭されたマルテンサイトが約 Hv830 であるのに対し、白色組織は約 Hv1230 であった。この大きな硬度差によって、白色組織の境界で疲労き裂が発生したと考えられる。

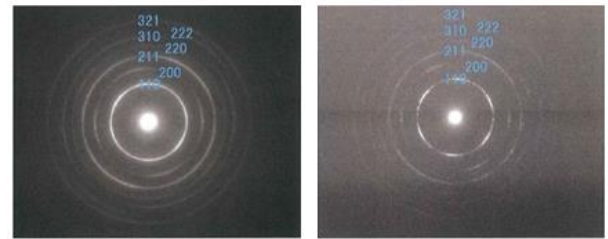


(a) 白層剥離の歯面損傷



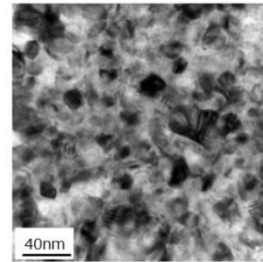
(b) 微小剥離の破面 (c) 内部の白色組織とき裂

図 1 歯車の白層剥離の事例



(a) 歯車の白色組織の電子回析像

(b) ベアリングの白色組織の電子回析像



(c) 組織写真

図 2 歯車の白色組織の TEM 観察結果

2.2. 白層剥離のメカニズム

歯車の白色組織はベアリングと同じ組織であることが確認され、さらに同じ転動疲労の現象であることから、歯車の白層剥離は基本的にはベアリングと同じ水素脆性型の転動疲労^{[3][4]}の可能性が考えられる。しかし、歯車とベアリングでは、白色組織の発生深さおよび形態に違いが認められる。これは歯車とベアリングの材料、摺動状態および応力場の違いが影響していると考えられる。一般的にベアリングに比べて歯車は、使用される面圧が高く、すべり率も高い。また、歯車はかみ合いに伴い振動が発生する。これらが摺動面の状態および鋼中に侵入した拡散性水素に影響を及ぼすことで白色組織の発生に影響していると考えられる。歯車の白層剥離で考えられるメカニズムを**図 3** に示す。

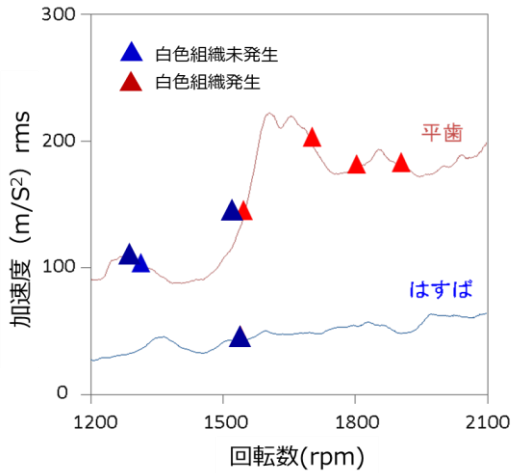


図 6 振動が白色組織に及ぼす影響

3.2. 潤滑に関する要因

ベアリングにおいてオイルの違いが白層剥離に影響することが報告 [5] [6] されており、歯車に於いても同様にオイルの影響が考えられる。ここでは、同等のベースオイルで添加剤が異なる 2 種類のオイル（オイル A、B）を用いてローラーピッチング試験を行なった。試験はすべ

り率と面圧を変えた水準で試験後の白色組織を観察した。観察された白色組織を図 7 に示すが、同じ試験条件に於いてオイル A に比べてオイル B は白色組織の発生が抑制されていることがわかる。ここでオイル A と B の粘度は変わらないため、オイル添加剤によって摺動状態が変わったことが白色組織の発生に影響したものと考えられる。

摺動状態を把握するために、摺動によりオイル添加剤と鋼が反応することで表面に生成するトライボフィルムの挙動を MTM トラクション計測記器で評価した。摺動面にトライボフィルムが生成するに従い金属接触が抑制され、電気接触抵抗 (ECR[※]) が変化する挙動を図 8 (a) に示す。また、生成したトライボフィルムの厚さを図 8 (b) に示す。オイル A に比べてオイル B はトライボフィルムの生成速度が速いことがわかる。これにより新生面の形成が抑制され、新生面からの水素侵入が少なくなり、オイル B で白色組織が発生しにくくなったと考えられる。

※ ECR とは電気接触抵抗率を示し、トライボフィルムおよび油膜が生成され金属同士が接触しなくなると 100%を示す。

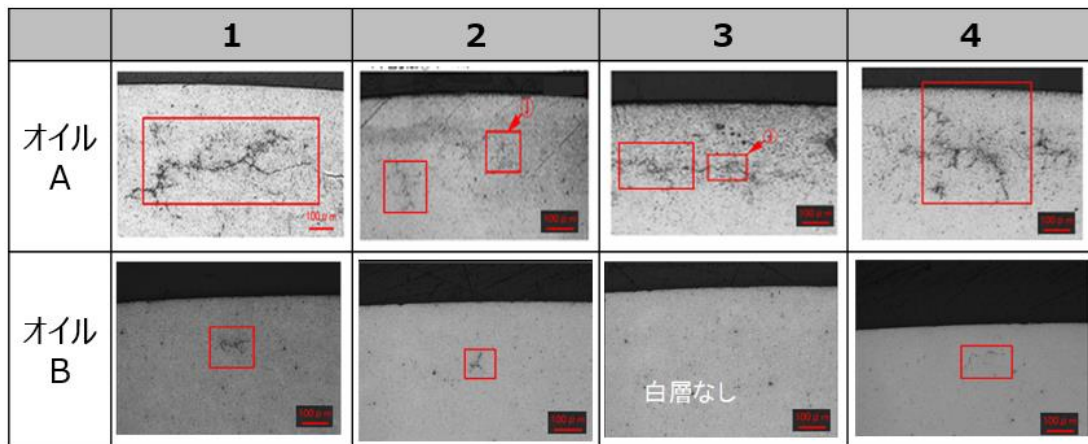
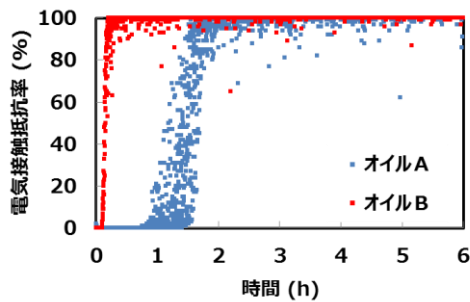
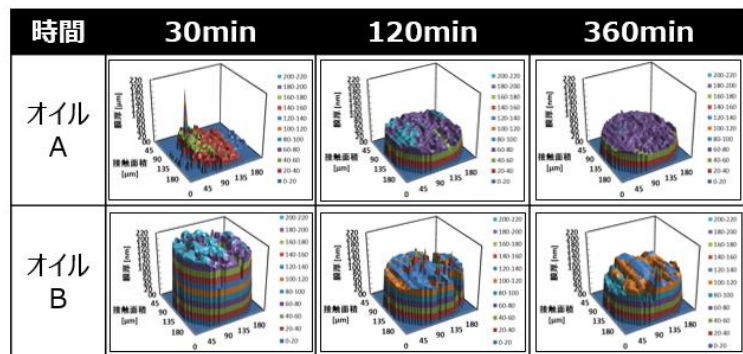


図 7 オイルによる白色組織発生の違い



(a) 電気接触抵抗 (ECR[※]) の変化



(b) トライボフィルムの厚さ

図 8 オイルの違いによる摺動状態の変化

3.3. 稼働条件の要因

白色組織の発生原因が拡散性水素であるならば、水素は応力場ではトラップされた状態であるが、応力がなければ自由に拡散するため、それ以上の水素脆性は起こらないことになる。ベアリングに於ける白色組織の発生は、水素の侵入速度に依存する^[3]という報告もあり、水素の侵入とトラップが白色組織に大きく影響していると考えられる。また、歯車における白層剥離は、市場で正常に稼働している歯車では報告されていないことから、歯車に於いては稼働状況の影響を受けているものと考えられる。通常、建設機械は、走行と作業を組み合わせを行い、またオペレータの交代もあるため、常に歯車が稼働している状態ではない。そこで、市場を模擬した一時的に停

止する運転条件による白色組織の発生を動力循環式歯車試験で評価した。試験では、ベンチ試験に相当する連続運転を行なった場合に白色組織が発生する条件に対して、市場の稼働状態を模擬した稼働と停止を組み合わせた2つのパターンで、一定の噛み合い回数まで試験を行なった。試験結果を図9に示すが、稼働と停止を組み合わせた運転条件では、いずれも白色組織は発生しなかった。これは、運転により発生し鋼中にトラップされた水素が濃化することによって白色組織が発生する^[5]前に、運転を停止することで水素が拡散し、白色組織が発生しなかったと考えられる。

運転	時間 (h)												白色組織
	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	
連続 (ベンチ試験)	[稼働]												発生
稼働-停止 1 (市場稼働)	[稼働] [停止]												未発生
稼働-停止 2 (市場稼働)	[稼働] [停止] [稼働] [停止]												未発生

図9 運転条件が白色組織に及ぼす影響

4. おわりに

歯車のベンチ試験で発生した白色組織を伴う歯面剥離に関して、白色組織の構造、歯車のかみ合いにおける要因を疲労試験および摺動試験を用いて評価した。得られた結果は、水素の挙動で説明でき、ベアリングで報告されている白色組織と基本的には同じ水素脆性型の転動疲労と考えられる。歯車の白色組織を伴う剥離は、かみ合いによる摺動表面でのオイルの分解、鋼中への水素の侵入と粒界および非金属介在物での水素のトラップと濃化、水素脆性による白色組織への変化、およびき裂の発生と進展により歯面が剥離したと考えられる。

1. 歯車の白色組織の多くは、深さ 40 μm 以下の表層近くにき裂を伴って発生しており、非金属介在物を起点に白色組織が生成している事例が認められた。またこの白色組織は、等軸晶の超微細なフェライト組織であった。
2. 白色組織は、面圧が増加するにつれて表面近傍に発生するようになり、さらに面圧を上げると深い位置に発生するようになることから、応力場の影響を受けている。

3. 白色組織は、すべり率が増加するに従って発生しやすい傾向が認められる。これは摺動表面に新生面が形成されることで、水素が発生しやすくなったためと考えられる。
4. 歯車のかみ合い振動が大きい場合に、白色組織が発生しやすい傾向が認められ、摺動と応力場の両面で水素が発生し蓄積されやすくなったと考えられる。
5. オイル添加剤の違いによって白色組織の発生状態に違いが認められるのは、オイル添加剤によって生成されるトライボフィルムの生成速度が変化し、水素の鋼中への侵入に影響したためと考えられる。
6. 歯車を連続運転した場合に白色組織が発生する条件にて、運転と停止を組み合わせた場合には、白色組織は発生しにくくなる。これは停止している間に水素が拡散することで、白色組織の発生が抑制されたと考えられる。

参考文献

- 【1】 例えば、村上保夫，武村浩道，中道治，小川隆司，桃野達信，岩本章，石原滋，“オルタネータ用軸受疲労メカニズムの解明”，NSK Technical Journal, No.656 (1993), pp.1-14.
- 【2】 例えば、平岡和彦，“転がり疲れによる白色型組織変化”，Sanyo Technical Report, Vol.15 No.1 (2008), pp.43-51.
- 【3】 藤田慎治，内田啓之，田中進，“耐白色はく離長寿命材料”，NSK Technical Journal No.679 (2005), pp.21-27.
- 【4】 濱田洋志，松原幸生，“軸受鋼の引張・圧縮疲労及び転がり疲労に及ぼす水素の影響”，NTN TECHNICAL REVIEW, No.74 (2006), pp.50-57.
- 【5】 木野伸郎，山本建，尾谷敬造，内山典子，“水素脆性型早期剥離の要因解析（水素脆性型剥離に及ぼす微小すべりの影響）”，日本機械学会論文集（A編），70巻696号（2004），pp.1072-1078.
- 【6】 木南俊哉，“水素脆性型の転動疲労強度に及ぼす侵入水素の影響”，電気製鋼，84（1）（2013），pp.55-60.

筆者紹介



Hayato Shichino
七野 勇人 1987年，コマツ入社。
開発本部 材料技術センタ



Shinpei Kariwa
刈和慎平 2012年，コマツ入社。
開発本部 材料技術センタ



Hiroto Kimura
木村 広人 2011年，コマツ入社。
開発本部 材料技術センタ

【筆者からひと言】

歯車の白層剥離の原因は水素脆性と考えられるものの水素脆性を起こす拡散性水素の挙動を直接的に捕らえることは難しく、本報告では、現象の理解と要因評価にとどまっている。今後の取り組みとしては、水素の挙動の見える化を図るとともに効果的な対策を確立できるよう、社内の関連部門との協業および社外の研究機関との共同研究を通して、この難しい損傷問題の解決を図りたい。

なお、本研究を進めるにあたり、豊橋技術科学大学元教授梅本実先生にご指導いただき、山陽特殊製鋼（株）平岡和彦氏に多大なる協力を得た。ここに深く感謝いたします。