

リマニュファクチャリングのための 浸炭部品の損傷評価手法

金澤智尚^{*1)} 吉本光宏^{*3)} ヴィニャス・ダン^{*2)} ベルトラン・ダニーロ^{*2)}
田原佑規^{*1)} 畑 典仁^{*3)} 菅原道雄^{*4)} 早川正夫^{**}

1. 評価手法開発の背景

環境に配慮した循環型社会への貢献は、産業界においても喫緊の課題として多種多様な取り組みが行われている。

その様な中で、リユースに分類されるリマニュファクチャリング(再生)は、サブパーツの再利用によって省資源効果に優れると同時に、他の資源循環手段と比較しても高い経済性を有することから、経済と環境の両立を可能とする手段として、世界的な注目を集めている⁽¹⁾。

近年において再生産業は、航空機、自動車部品、建設・鉱山機械の順に市場が拡大傾向にある。中でも、建設・鉱山機械の分野では、車体が長時間稼働となることから、定期メンテナンスが重要となり休車時間やコスト低減が顧客の関心事となっている。その上で、現地調達が可能で新品よりも安価な再生品は、部品交換で済むことから短時間の休車となるために需要が高い。しかしながら、再生品の中でも原動機や減速機などに多用される浸炭部品の歯車やベアリングは、目視判定や寸法測定のみでの再利用判定に留まり、外観で無損傷の状態でも、リスクの回避を優先し、再利用化が進んでいない。

そのため、日立建機㈱と物質・材料研究機構(NIMS)は、要素試験と市場回収済みの歯車から採取した試験片に対し、機械的・組織的な変化を破壊・非破壊の両面から捉えることで、浸炭部品の定量的な損傷評価手法を開発した。

2. 評価手法開発のコンセプト

先行文献では、要素試験後の機械的性質や組織変化を評価するものであり、負荷履歴が不明である稼働機械から回収した部品の損傷評価に直接適用することは困難である。例えば、要素試験片に対しては、X線回折法(XRD法)が先行しており、XRD法と渦流探傷測定との非破壊検査を主として、疲労損傷が増加するにしたがい、残留オーステナイト相(γR)が減少した例や、電圧との相関性を示した事例がある。また、負荷回数と残留応力(σ_x)の相関関係から余寿命の予測式を提案されている。他には、X線回折ピークの半価幅が減少する傾向を見出されている⁽²⁾⁻⁽⁵⁾。

そこで本評価手法では、**図1**の通り、ローラピッチング試験片および稼働中の機体より回収した歯車を破壊・非破壊手法にて相対比較しながら、評価を行った。試験条件は**表1**の通りであり、表層・断面組織の観察をマイクロスコープと走査型電子顕微鏡(SEM)にて行い、非破壊検査手法として、XRD($\cos\alpha$ 法)を用いた。本手法では、損傷プロセスを機械的性質・組織的变化と関連付けることによって、市場回収された浸炭部品の再利用判定に科学的根拠を示すものである。

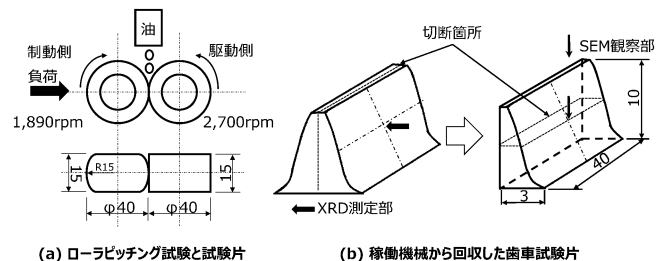


図1 ローラピッチング試験と各試験片形状。

表1 ローラピッチング試験条件。

No.	負荷, P / kN	面圧, SP / GPa	すべり率, $Sr (\%)$	試験オイル	流量, $Fr / (\text{ml}/\text{min})$	温度, $T / ^\circ\text{C}$
1	1	2.0	30	GL490	300-450	80±5
2	6	3.7				

* 日立建機株式会社；1)主任，技師，2)一般，3)部長代理，4)事業部長

** 国立研究開発法人物質・材料研究機構；グループリーダー
Damage Evaluation of Carburizing Gear for Remanufacturing;
Tomohisa Kanazawa*, Mitsuhiro Yoshimoto*, Dan Vinas*,
Danilo Beltran*, Yuuki Tahara*, Norihito Hata*, Michio
Sugawara* and Masao Hayakawa**(*Hitachi Construction
Machinery Co. Ltd. **National Institute for Materials
Science)

2021年10月28日受理[doi:10.2320/materia.61.106]

3. 損傷評価手法の提言

(1) 表層・断面組織の評価

ローラピッチング試験前後の表層状態を図2に示す。試験前(a)と同様に面圧2.0 GPa (6.4×10^4 サイクル, 1.3×10^6 サイクル)の(b)と(c)には、明瞭なクラックは認められなかった。面圧3.7 GPa (2.6×10^5 サイクル)の(d)では、摺動面に明瞭なクラックが認められ、(e)ではピッチング損傷が顕在化した。稼働後の歯車(f)は、試験前材(a)と同様の形態を呈しており、稼働後の歯車表層(g)には擦れた痕跡があるものの明瞭なクラックやピッチングは認められなかった。したがって、表層形態のみでは、微視的な損傷挙動の変化を捉えられないと言える。

次に、表層断面のSEM像を図3に示す。試験前材(a)では、マルテンサイト相の中に単一のコントラストを有する γ R(白矢印)が認められる。稼働後の歯車(b)は、微細な γ Rは見られるものの、幅 $2 \mu\text{m}$ を超える粗大な γ Rが消失している。ピッチング損傷材の表層断面(c)では、微細な γ Rが消失した。

図4は γ Rの粒子面積のヒストグラムであり、図3の組織観察を反映している。試験前材では γ Rの平均面積 $0.74 \mu\text{m}^2$ 、面積率(γ Rの粒子面積の総和 \div 視野面積)は25%であったが、稼働後の歯車では平均面積 $0.56 \mu\text{m}^2$ 、面積率14%と減少した。ピッチング損傷材では、平均面積 $0.59 \mu\text{m}^2$ 、面積率5%であり、負荷に伴い γ Rの個数、粒子面積、面積率が減少した。 γ Rの面積率の関しては、XRDによる非破壊検査でもほぼ同様の傾向が得られており、損傷プロセスを反映していると考えられる。

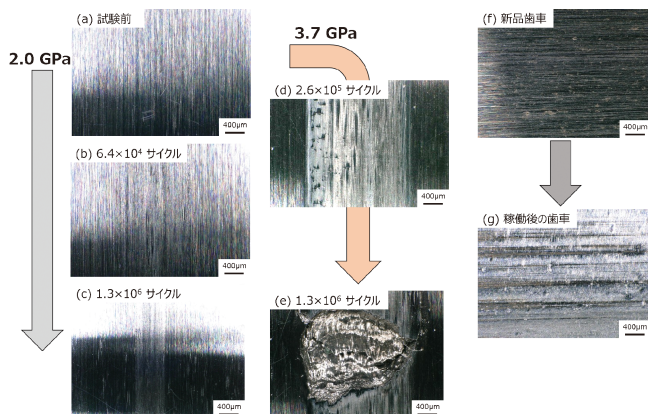


図2 ローラピッチング試験片と歯車の表層面の経時変化。

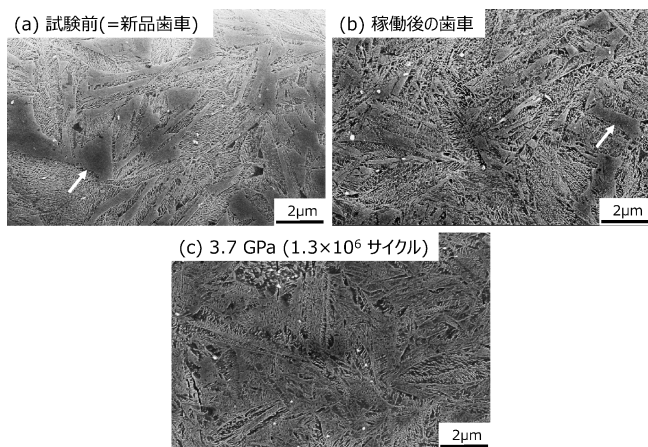


図3 浸炭処理の断面組織のSEM像-焼き戻しマルテンサイト相と残留オーステナイト相(白矢印)。

μm^2 、面積率(γ Rの粒子面積の総和 \div 視野面積)は25%であったが、稼働後の歯車では平均面積 $0.56 \mu\text{m}^2$ 、面積率14%と減少した。ピッチング損傷材では、平均面積 $0.59 \mu\text{m}^2$ 、面積率5%であり、負荷に伴い γ Rの個数、粒子面積、面積率が減少した。 γ Rの面積率の関しては、XRDによる非破壊検査でもほぼ同様の傾向が得られており、損傷プロセスを反映していると考えられる。

(2) 損傷評価手法

XRD法により得られる σ_x 比と γ R比の関係から歯車の損傷評価の検討を試みる。図5の通り、無損傷の領域Aでは、 γ R比の減少に伴って σ_x 比が増加する傾向があり、本領域では、表層面の観察結果[図2(b),(c),(g)]からも、マイクロクラックは形成されていない。したがって、従来であれば目視判定や寸法測定のみで再利用可能と判定している歯車に対し、 γ R比と σ_x 比の数値からも、より信頼性の高い評価が可能となる。

一方で、損傷を伴う領域Bでは、図2(d)の様なピッチング部以外の摺動面においても、 γ R比と σ_x 比が全面に渡って著しく減少しており、摺動疲労に伴う微視的な変化も捉えられていると想定される。よって、目視判定などの簡易評価では判定が困難な歯車でも、 γ R比と σ_x 比の数値により再利用不可能との判定が、高い精度で可能となる。

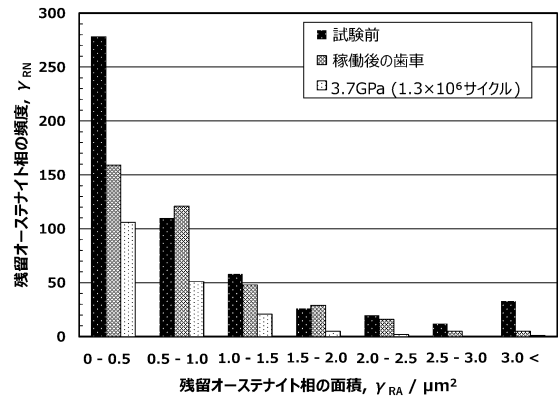


図4 残留オーステナイト相サイズの変化を示すヒストグラム。

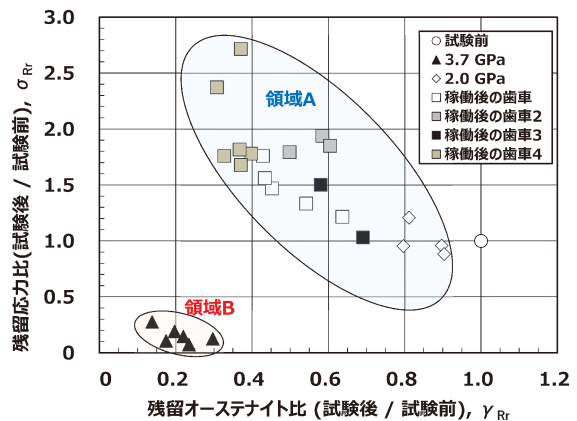


図5 損傷評価における残留応力比と残留オーステナイト比の関係。

すなわち、損傷評価の信頼性向上には、目視評価および寸法測定以外に、本手法での評価結果ならびに組織形態を系統的にまとめたデータベース化(DB)が必要となる。しかし実用上は、再利用判定時に破壊検査が出来ないことから、DBの情報に基づき、浸炭部品表層部に対して、 γR 比と σx 比の低下域を再利用可否の評価基準とすることが求められる。以上により、従来手法よりも機械的・組織的な観点を考慮した形で、信頼性の高い損傷評価が、浸炭部品に対して実現可能と期待される。

4. 実用化と今後について

本技術は、特開2021-103088の通り知財として出願公開されており、日本金属学会誌にも本技術の一部内容が、技術論文として掲載されている⁽⁶⁾⁽⁷⁾。加えて、2021年5月には、日立建機とNIMSの共同プレスリリースとして公表され、日本経済新聞社や日刊工業新聞社などの主要メディアにて掲載されている⁽⁸⁾⁽⁹⁾。

実用面では、日立建機において2021年度5月より日本国内の拠点にて本手法の導入を開始しており、**図6**の通り、AI技術も活用した機能向上の検証も進めている。

これまでの実績では、本手法の導入以前で100%スクラップとしていた歯車が、導入後はスクラップ率70%と改善され、約3割の歯車が再利用可能となっている。再利用可能な部品の増加に伴い、環境面においても貢献している。

今後、本手法が日立建機の主要拠点で活用され始めると、国内拠点での上述したスクラップ率の実績から鉄のスクラップ量は、約30(ton/年)低減されると試算している。また、Life-Cycle Assessment手法に基づいた鉱山機械一台のライフサイクル(LC)当たりの歯車部品の二酸化炭素の排出量は、**図7**の通り約14(ton-CO₂/LC)と試算されており、本手法の展開によって、カーボンニュートラルの実現にも大きく寄与することが期待される⁽¹⁰⁾。

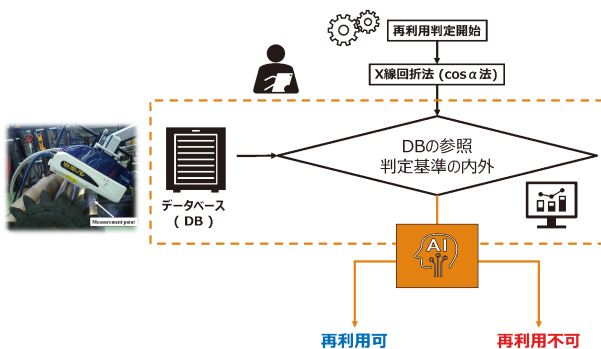


図6 再利用判定のプロセス。

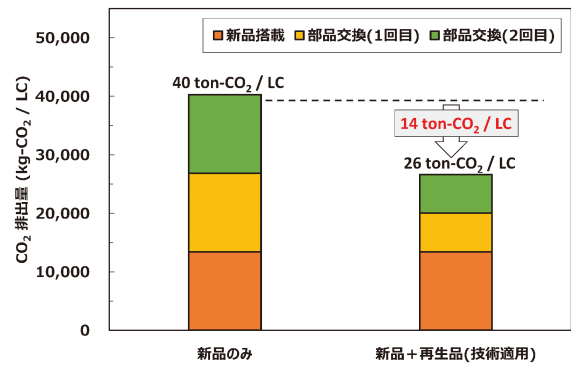


図7 鉱山機械1台のLC当たりの歯車部品のCO₂排出量。

5. 今後の展開

リマニュファクチャリングは、新しい産業であることも影響し、研究開発事例の報告件数は、他産業と比較が少ない。しかしながら、今後の循環型社会の形成において、重要産業の一つとされている⁽¹¹⁾。したがって、研究開発がより活発になると予想される中で、本事例の再利用判定技術は、先駆的な開発事例となり、歯車の他にベアリングなどの部品にも展開が可能と考えられる。他にも、溶接部位の余寿命診断などにも応用の可能性があり用途は広く、具体的な産業への展開に関しては、航空・宇宙分野のエンジン、プラントの高圧配管、自動車のトランスミッションなどへの技術転用も期待される。

文 献

- (1) 松本光崇, 土屋哲男, 板垣宏知: エレクトロニクス実装学会誌, **24**(2021), 1-7.
- (2) 野村 剛, 大平隆昌, 三田村宣晶, 名取理嗣, 植田 徹, 上光一郎, 馬上英信: 国際特許 WO 2011/074654, (2011), 1-35.
- (3) T. Kanazawa, M. Hayakawa, D. Beltran, M. Yoshimoto, K. Saito, Y. Maruyama, M. Uchiyama and T. Sasaki: Mater. Trans, **62**(2021), 135-138.
- (4) 嘉村直哉, 藤田 工, 佐々木敏彦: 材料, **67**(2018), 694-699.
- (5) 吉崎正敏, 川原正明: 日本機械学会誌, **85**(2019), 1-16.
- (6) 金澤智尚, 吉本光宏, 畑 典仁, 早川正夫, 目黒 奨, 廣戸孝信, 松下能孝: 特開2021-103088, (2021), 1-19.
- (7) 金澤智尚, 早川正夫, 田原佑規, 畑 典仁, 吉本光宏, 目黒奨, 廣戸孝信, 松下能孝, 菅原道雄: 日本金属学会誌, **85**(2021), 198-206.
- (8) https://www.hitachicm.com/global/jp/news-list_jp/21-05-20j/, (2021.09.24参照)
- (9) https://www.nikkei.com/article/DGXLRSP610704_Q1A520C2000000/, (2021.09.24参照)
- (10) 金澤智尚, 松本光崇, 吉本光宏, 菅原道雄, 吉村彰大, 松野泰也: 日本LCA学会誌, **17**(2021), 124-135.
- (11) 梅田 靖: サーキュラーエコノミー, 勁草書房, 初版(2021), 5-8, 26.