

連铸セグメントロール軸受潤滑オイルエア化による 寿命延長

Establishment of Oil-Air Lubrication System in Continuous Casting Machine

萩尾 勇樹 HAGIO Yuki JFE スチール東日本製鉄所 (千葉地区) 設備部 製鋼設備室 主任部員 (副課長)

要旨

連続铸造機のセグメントには、多数の軸受が使用されている。セグメントの軸受は極低速回転、高荷重、高温、水蒸気雰囲気といった過酷な環境下で使用されており、非常に短寿命である。セグメントの軸受が破損に至るとセグメント単位での取替となり、ライン停止による生産ロスが発生してしまう。そのため、対策としてセグメント軸受潤滑にオイルエア潤滑方式を導入した。本論文では、セグメント軸受の破損メカニズムとオイルエア潤滑の効果について述べる。

Abstract:

A large number of bearings are used in the segment of the continuous casting machine. The bearing used in the segment causes troubles frequently due to the severe environment such as extremely low speed of the rotation, higher load and higher temperature. Even one failure of the bearing in the segment causes a replacement of the segment, and entire facilities need to be shutdown. Therefore, as a countermeasure, Oil-Air Lubrication system was introduced for bearing lubrication. In this paper, we describe the breakage mechanism of bearing and the effect of Oil-Air Lubrication system, which is installed in our continuous casting machine.

1. はじめに

製鋼工場の連続铸造設備 (図 1) では、溶鋼をモールドと呼ばれる鑄型に注ぎ、セグメント (図 2) と呼ばれるロールが対になったユニットの中を凝固させながら铸造し、スラブを製造する。連続铸造機は 24 時間連続で稼働しており、安定操業が求められている。

セグメントには、1000 点以上の多数の軸受が使用されており、軸受の種類としては、負荷容量や調心性の点で有利な自動調心ころ軸受を使用している。軸受回転数は 5 rpm 以下の極低速回転であり、軸受荷重は $C_0/P < 7$ の高荷重である。また、高温 (約 1000°C) のスラブが軸受直近を通過するため、高温環境となっている。さらに、スラブへの二次冷却水をスプレーにて噴霧することから蒸気環境下でもある。

極低速回転、高荷重、高温、水蒸気雰囲気といった過酷な環境の中で軸受は使用されており、軸受起因によるトラブルが後を絶たない。従来、軸受の潤滑方式はグリース潤滑方式を採用しており、一定時間ごとに自動で間欠給脂される。いずれか 1 つの軸受が破損に至るとセグメント単位での取替が必要となり、設備全体の停止につながり生産ロス

が発生するため、軸受の強硬化が求められている。これらの問題を解決するために、従来採用していたグリース潤滑

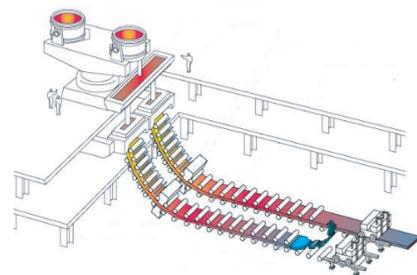


図 1 連続铸造設備概要

Fig. 1 Continuous casting machine

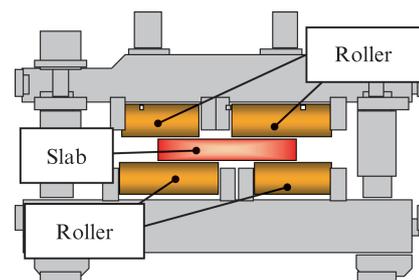


図 2 セグメント概要図

Fig. 2 Segment unit

2019 年 2 月 26 日受付

方式に替えて、オイルエア潤滑方式を導入し、その効果を評価した。

2. 軸受破損原因

2.1 トラブル内容

図3に過去6年間の軸受起因によるセグメントの計画外交換数を示す。写真1に示すように軸受の外輪にフレーキングが発生し、最終的に保持器や外輪が破損している。軸受起因による計画外セグメント交換は、平均すると年に5~6台発生しており、それに伴う生産ロスも比例して増大していることから、軸受の安定化が求められている。

2.2 軸受破損要因推定

図4に軸受の摩耗プロフィール及び摩耗の模式図を示す。

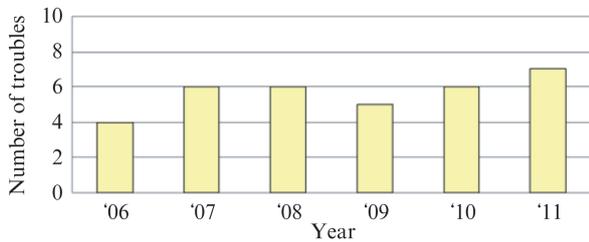


図3 計画外セグメント交換数
Fig. 3 Number of segment troubles



写真1 軸受損傷状況
Photo 1 Broken bearing

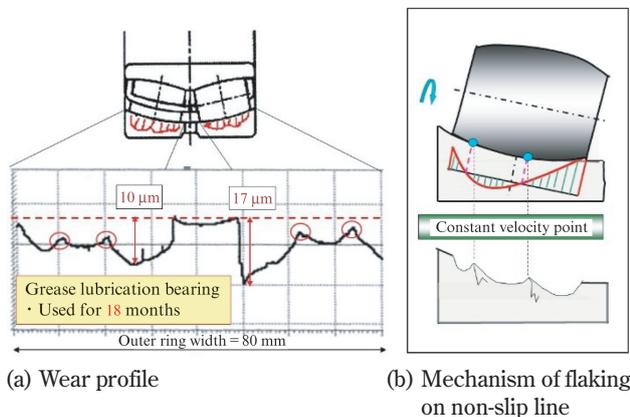


図4 二山摩耗の原理
Fig. 4 Mechanism of flaking on non-slip line

一般的に自動調心ころ軸受は、外輪軌道面の径の方がころの径よりも大きく、外輪ところの円弧が等しくないため、2箇所等の等速点を除いて転がり時に周速差が生じ、2箇所の等速点が摩耗しない二つの山として残る。この二山摩耗における二つの山頂に応力が集中することにより微小亀裂が発生し、フレーキングに至る¹⁾。さらに、フレーキングからクラックが進展して軸受が破損し、ロールが不転となり、スラブにすり傷が入る等の品質上の問題が起きることから操業を継続できない状態となる。

外輪ところの間にはグリースにより油膜が形成されているはずであるが、何らかの要因により油膜が破断して外輪ところが金属接触を起こし破損にまで至っていると推定される。

2.3 油膜形成

油膜破断して軸受の摩耗が生じる要因を解明するためには、油膜形成状況と軸受内異物状況を調査する必要がある。まず油膜形成状況について述べる。

油膜厚さは式1に示すDowson・Higginsonの式²⁾で表される。式1より、荷重が大きく、速度が低いほど膜厚は小さくなるのが分かる。連続铸造機は、スラブを铸造しているため高荷重となり、ロールの回転数も遅い。さらに、高温環境下のため油の粘度も低くなることから、油膜形成を担保できない劣悪な環境であると言える。

$$\frac{H_{min}}{R} = 2.65 \frac{G^{0.54} U^{0.7}}{W^{0.13}} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 H は油膜厚さ、 R は相当半径、 G は粘度、 U は速度、 W は荷重である。

次に、実際に使用しているグリースとオイルエア潤滑用のオイルについて、潤滑領域の調査を行った。油膜厚さは弾性流体潤滑 (EHL, Elastohydrodynamic Lubrication) 油膜厚さ試験機 (図5) を用いて測定した。測定方法は以下のとおりである。ガラスディスクの裏面に潤滑剤を塗布して剛球と接触させ、剛球を回転させ、ガラスディスク越しに光を入射させると、ガラスディスク底面と鋼球面で反射した

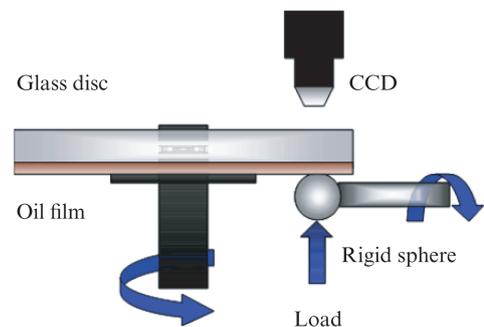


図5 EHL油膜厚さ試験機
Fig. 5 Schematic diagram of thin film optical method

光との干渉により油膜厚さに応じた干渉膜が生じる。縞と縞の間隔を計測することで膜厚を測定する。剛球には荷重をかけられるようになっており、荷重の変化に対する油膜厚さの変化も測定できる。

図6に CCD で撮影した光干渉膜での膜厚の様子を示す。また、計算結果及び膜厚試験結果を図7に示す。連続铸造機では、グリースで 50~120 nm, オイルで 15~30 nm の膜厚となった。

グリースの場合は、膜厚分布が不均一になっている。特に、滑りを与えた場合において不均一になる傾向が強い。なお、グリースの膜厚が大きくなっているのは、ウレタ構造の増ちょう材が添加されており膜厚を増大させているためである。

オイルの場合は、滑りや面圧の変化を与えた場合でも膜厚は変化せず、速度だけに依存した結果が得られた。

また、潤滑領域を示す指標として下記の油膜パラメータが知られている。油膜パラメータ Λ を式2に示す。

$$\Lambda = \frac{H}{\sigma} \quad \text{..... (2)}$$

ここで、 Λ は油膜パラメータ、 H は油膜厚さ、 σ は表面粗さである。

実測した油膜厚さから油膜パラメータを求めると、グリー

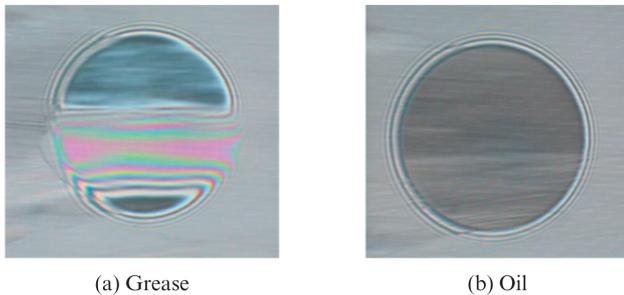


図6 油膜測定様子

Fig. 6 Thin oil film measurement

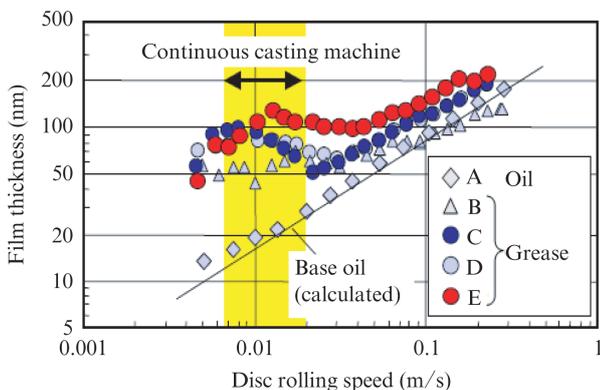


図7 速度と膜厚の関係

Fig. 7 Relationship between velocity and oil film thickness

ス潤滑において 0.02~0.03 となり、潤滑領域としては境界潤滑領域 ($\Lambda < 1$) に属する。境界潤滑領域とは、油膜が著しく薄くなり、滑りあう固体表面間にある吸着分子膜の厚さが分子の大きさ程度となり、さらに局所的に個体間の接触を生じ、流体潤滑理論が適用できなくなる領域である。連続铸造機のセグメントは、油膜形成が不十分な非常に厳しい潤滑環境であることが判明した。

2.4 軸受内異物状況

軸受内異物を調査するため、図8に示すようにオンラインに設置してあるセグメント軸受から排脂配管を延長し、排グリースサンプリングにより鉄粉濃度を測定した。

図9に軸受内における鉄粉濃度の推移を示す。鉄粉濃度は稼働開始直後が最も高く、その後低下して 0.08 wt% 程度に漸近することが分かる。

図10に排出グリースのフェログラフィの分析結果を示す。摩耗粉は軸受片であり、大きさは最大で 65 μm 程度であることが分かった。摩耗粒子の形態は、正常摩耗粉と異常摩耗粉との2つに区分されるが、異常摩耗粉であることが分かった。

この結果から、軸受内の異物は外部から侵入したのではなく、軸受自体の自己摩耗粉であることが判明した。異物の大きさは、油膜厚さよりも大きく、摩耗粉により油膜破断

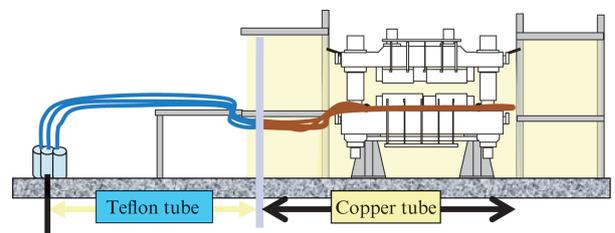


図8 排グリースサンプリング様子

Fig. 8 Sampling system of discharge grease

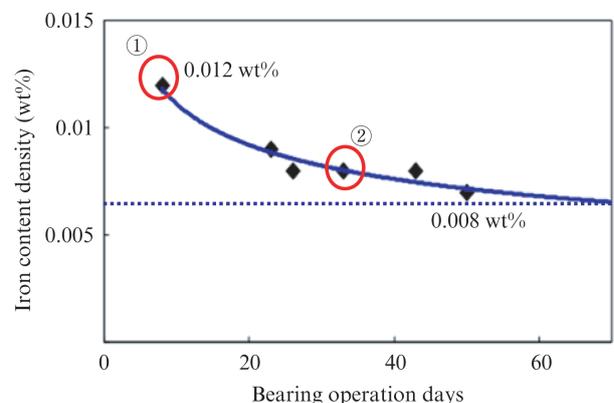


図9 軸受内鉄粉濃度の推移

Fig. 9 Trend of iron concentration in discharge grease

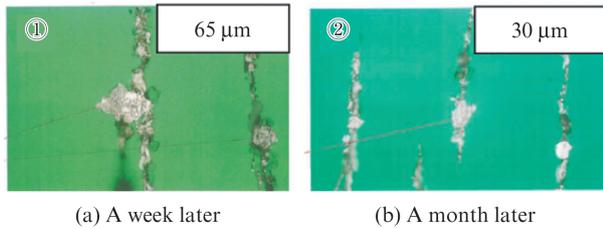


図 10 フェログラフィ分析結果 (グリース)
Fig. 10 The analysis of ferrography (Grease)

が発生して軸受の摩耗を促進していると考えられる。

2.5 軸受破損メカニズム

前述したように、軸受内の異物は軸受の自己摩耗粉であること、摩耗粉の大きさは最大で $65\mu\text{m}$ であることが分かった。図 11 に軸受摩耗メカニズムの概念図を示す。連続鋳造機の軸受では、境界潤滑領域下において、自己摩耗粉が軸受内で発生し、摩耗粉により油膜が破断し、軸受摩耗が促進され急速に軸受が摩耗する。

軸受寿命を延ばすには、軸受内の異物を除去し軸受内を常時清浄に保つことが重要である。そこで、清浄性に優れたオイルエア潤滑方式について検討を行った。

3. オイルエア潤滑方式の導入

3.1 オイルエア潤滑方式概要

図 12 にオイルエア潤滑システムの概略図を示す。ミキシングブロック内において、圧縮空気の流れる通り道にオイルを滴下し、液状のまま管路内壁を連続的に軸受まで搬送させる集中潤滑方式の一種である。このような気体と液体が共通の通り道を通る流動形態を気液二相流と呼び、一定油量を連続的に液状のまま供給するために、環状流による潤滑搬送を行っている。

3.2 グリース潤滑との比較

図 13 にグリース潤滑とオイルエア潤滑の比較を示す。JFE スチールではグリース潤滑方式の中でグリースエア方式

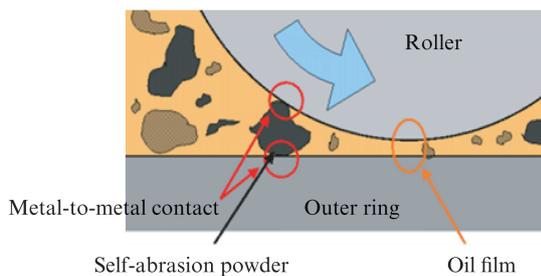


図 11 軸受摩耗メカニズムの概念図
Fig. 11 Conceptual diagram of bearing wear mechanism

式を採用していた。グリースエア方式はグリースとエアを別々の配管から供給しており、グリースは軸受下部から供給し、エアはオイルシールとダストシールの隙間から供給している。グリースの供給量は $6\sim 10\text{cc/h}$ であり、一定のインターバルを置いて供給している。エアはシール間から供給しており、水や異物の浸入を抑止する効果がある。

オイルエア潤滑は連続給油であり、常時新鮮なオイルを供給可能である。供給量は $1\sim 3\text{cc/h}$ で、グリースと比較して供給量を抑えることができる。また、軸受内の異物を含むオイルを排出するため、軸受内は清浄に保たれ、常時圧縮空気を軸受に供給するため、軸受内部が正圧となり水や異物の混入を防止でき、冷却効果も期待される。軸受保護、環境改善の面においても非常に有効である。

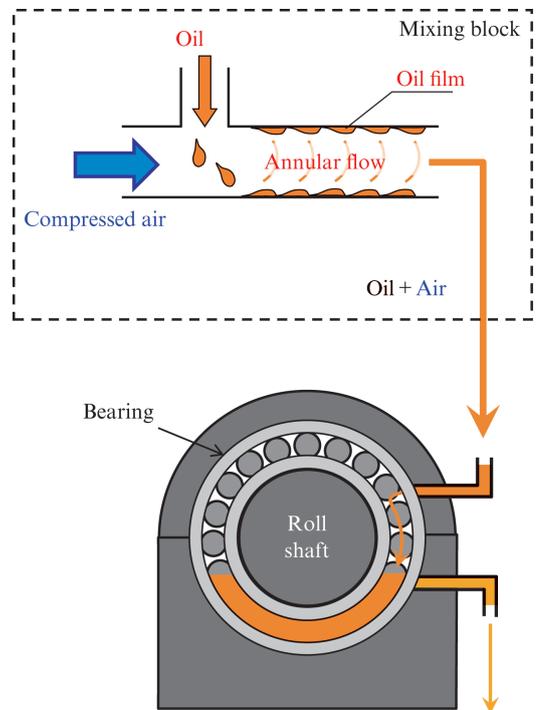


図 12 オイルエア潤滑方式の搬送原理
Fig. 12 Principle of oil-air lubrication system

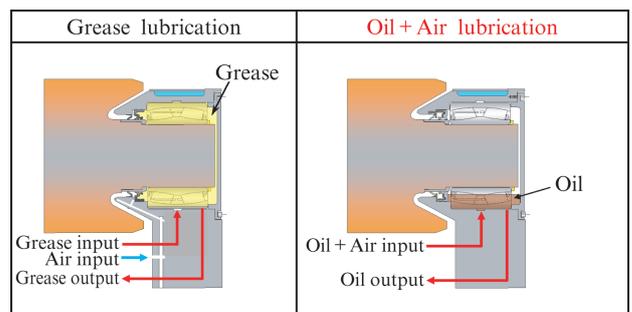


図 13 グリース潤滑とオイルエア潤滑の比較
Fig. 13 Comparison of grease lubrication and oil-air lubrication

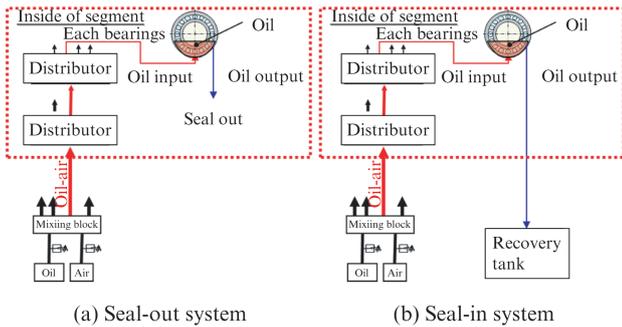


図 14 シールイン及びシールアウト

Fig. 14 Seal-out system & seal-in system

3.3 オイルエアにおける軸受内構造比較

オイルエア潤滑方式は軸受内の構造で、シールアウトタイプとシールインタイプの2種類に区分される。

図 14 (a) に示すシールアウトタイプは、軸受に供給されるオイルを軸受内のシール部から排出させる構造である。オイルエアシステムは、供給側の圧力監視のみで管理している。軸受内の背圧制御をシールに依存していることからシールの性能が重要となる。また、圧力スイッチ以降の配管に支障が出た場合に異常の検知が困難であり、軸受内の状態管理が出来ないことがデメリットとして考えられる。

図 14 (b) に示すシールインタイプは、シールアウトタイプのようにシール部からオイルを排出するのではなく、軸受内の排油口からオイルを排出し、排出オイル用の配管を通して回収タンクまで回収している。軸受状態は、シールアウトタイプと同様に、供給側の圧力監視で管理している。

3.4 オイルエア潤滑管理方法の確立

JFE スチールでは、更なる軸受状態管理向上を目指し、図 15 に示すように排出側へモニタリングパネル (写真 2) と呼ばれる監視盤を設置している。

モニタリングパネルでは、軸受一点一点の状態管理が可能である。具体的には、軸受内の背圧 (圧力) 値の確認、モニタリングパネル内の透明チューブ箇所からのオイルエア戻り状況の目視確認を行っている。また、背圧制御用のオリフィスも設置してあるため容易に取替が可能であり、背圧調整をモニタリングパネル内で実施できる。さらに、モニタリングパネル内において排出オイルのサンプリングも実施できるため、定期的に鉄粉濃度分析を行うことができる等、オンラインにある軸受の詳細な状態を管理できる体制を構築している。

モニタリングパネルで異常が発見されれば、軸受が損傷する前に未然に対策を取ることが可能となる。供給側の圧力監視だけでは防ぐことができない様々なトラブルを防止することができ、オイルエア潤滑方式の能力を最大限発揮できる体制である。

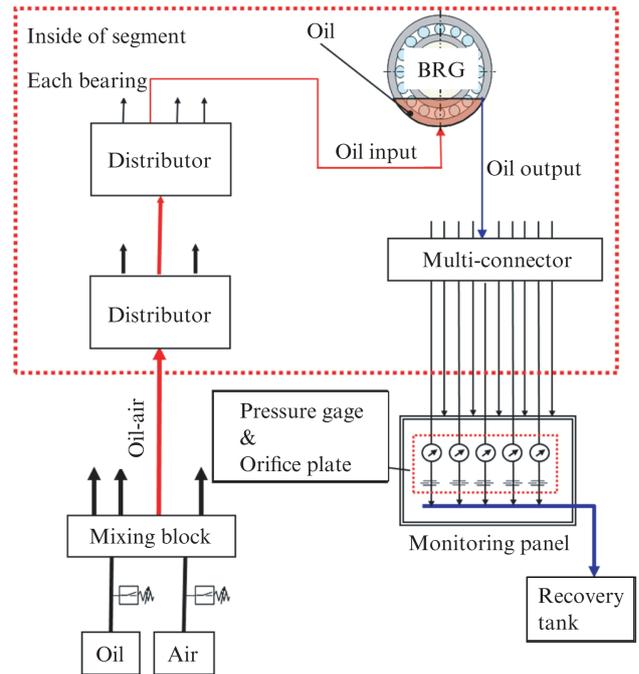


図 15 オイルエア潤滑システム構成

Fig. 15 Oil-air lubrication system



写真 2 モニタリングパネル

Photo 2 Monitoring panel

3.5 オイルエア潤滑実機検証

オイルエア潤滑方式導入に当たり、グリースエア潤滑部のセグメント1台をオイルエア潤滑へ変更して、実機テストを行った。対象セグメントは、過去に何度も軸受破損で計画外セグメント交換を実施した湾曲帯セグメントである。オイルエア潤滑に関しても図 8 のように排油配管を延長して排出されるオイルの正常状態管理を実施し、常時軸受の状態が把握できる環境とした。図 16 にオイルエア潤滑を導入した軸受における排出オイルの鉄粉濃度推移を示す。比較するために、当該セグメント箇所における過去のグリースエア潤滑時の値も併せて記述している。

グリースエア潤滑の場合は、鉄粉濃度が乱高下する時

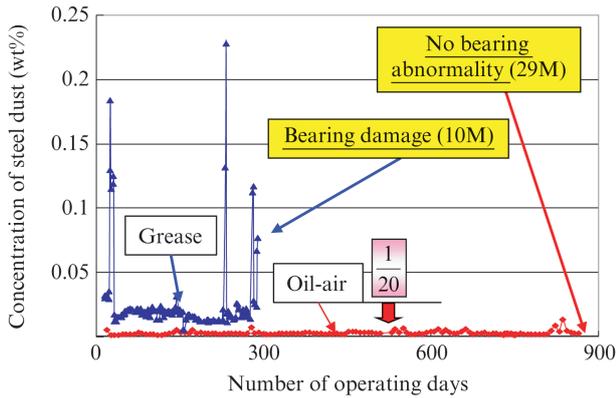


図 16 排出油脂中の鉄粉濃度推移

Fig. 16 Trend of iron concentration in discharge grease

期がある。これは、軸受の摩耗が常時進行しているためだと考えられる。一方、オイルエア潤滑では、鉄粉濃度がグリースエア潤滑と比較して、1/20 程度の水準で推移していることが分かる。これは、オイルエア潤滑では常時新鮮な油を供給することで、軸受内で発生した鉄粉が軸受外に排除されているためと言える。

図 17 にオイルエア潤滑時のフェログラフィー分析結果を示す。稼働後一週間の分析結果より初期摩耗粉と見られる軸受片が見つかり、分析の結果、正常摩耗粉であることが分かった。稼働後一ヶ月以降の分析結果では、摩耗粉は小さくなり、かつ観察されたのは正常摩耗粉のみであった。

図 18 にグリースエア潤滑使用軸受とオイルエア潤滑使用軸受の外輪摩耗プロファイルの測定結果を示す。グリースエア潤滑の場合は自動調心ころ軸受特有の二山摩耗が顕著に現れているが、オイルエア潤滑による軸受は外輪に目立った摩耗はなく、二山摩耗も発生しておらず、健全な状態であることが分かる。

また、オンライン期間において、グリースエア潤滑では 10 ヶ月程度で軸受に異常が発生し計画外でのセグメント交換を行っていることに対し、オイルエア潤滑では 29 ヶ月使用しても異常が発生しない結果となった。これは、当該セグメントにおける従来の記録の約 2 倍にあたるオンライン最長記録である。

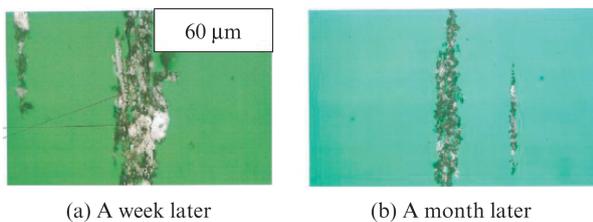


図 17 フェログラフィー分析結果 (オイルエア)

Fig. 17 Analysis of ferrography (Oil)

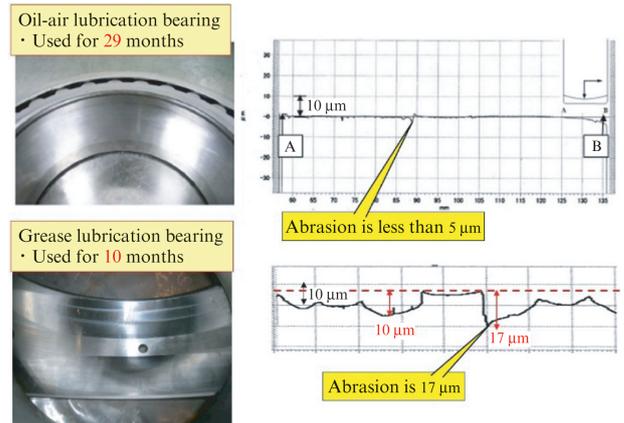


図 18 軸受摩耗プロファイル

Fig. 18 Wear profile

潤滑方式に関わらず、初期摩耗は同等量が発生していると考えられる。グリースエア潤滑の場合、洗浄効果は期待できず全ての摩耗粉を排出できずに抱え込み、摩耗粉が混入したグリースは自らが研磨剤のような役割となり、さらに摩耗を促進する。一方、オイルエア潤滑は、鉄粉濃度推移やフェログラフィの分析結果から見ても洗浄能力に長けており、その効果により油膜形成が担保され長寿命化につながっている。

オンラインで実機検証を行った結果、オイルエア潤滑方式は、常時新鮮なオイルを供給することで軸受内を清浄かつ正圧に維持できるため、軸受の油膜破断が発生せず軸受摩耗を低減させるため、長寿命化に有効であることが分かった。

4. おわりに

連続鑄造機のセグメントにおけるオイルエア潤滑システム導入までの検討について述べた。以下にまとめを記す。

- (1) セグメント軸受の破損メカニズムは極低速回転、高荷重、高温、水蒸気雰囲気により油膜形成が不十分となり、グリース潤滑においては軸受内の洗浄能力が劣ることで自己摩耗粉により摩耗が進展することを明らかにした。
- (2) セグメント軸受にオイルエア潤滑を導入したところ、軸受摩耗が低減し寿命が約 2 倍に延長したことにより、清浄化に長けるオイルエア潤滑の有効性を実証した。
- (3) オイルエア潤滑管理において、排出側にモニタリングパネルを設置することで、軸受一点一点の状態管理が可能となった。異常検知によりトラブルを未然に防止することが可能となり、オイルエア潤滑の能力を最大限発揮できる体制となった。

参考文献

- 1) 瀬良泰三, 佐藤裕二, 岡本謙, 中島聡. 連続铸造設備の高信頼性技術.
JFE 技報. 2006, no. 11, p. 9-14.
- 2) 木村好次, 岡部平八郎. トライボロジー概論. 1984, p. 111.



秋尾 勇樹