

Technology to Prolong Rolling Bearing Life Used in Steelmaking Plants



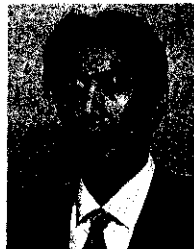
植島 好紀
Yoshiaki Uejima

水島製鉄所 設備技術
部設備技術室 主査
(課長補)



岡本 謙
Ken Okamoto

千葉製鉄所 設備技術
部設備技術室 主査
(主席掛長)



伊崎 健太
Kenta Izaki

水島製鉄所 設備技術
部設備技術室

要旨

製鉄設備では、連続鋳造機のガイドロールや圧延のロールに代表されるように、多数の回転機械が使用されている。軸受の損傷は、製造設備の停止に直結するため、設備管理上の重要ポイントになっている。しかし、軸受に対する負荷条件や環境条件は千差万別であり、損傷パターン也多岐にわたる。本稿では、設備故障を低減するため、製鉄所内で発生した転がり軸受の損傷状況を解析し、それぞれの原因に対応した改善を図っている。その中から自動調心ころ軸受に着目した長寿命化技術と転がり軸受に関する改善事例について述べる。

Synopsis:

There are a great number of rotary machines, of which typical examples are guide rolls at continuous casting machine and process rolls at rolling mill in steel making plants. Bearing damage reflects directly on the down time of equipment, and is also one of the most significant issues of mechanical parts for plant management. Though loading conditions and surrounding environment upon each bearing variously depend on each process line, so that several patterns of damages can be discovered among those bearings. To reduce equipment failure, analyses on the damages of rolling bearings occurred in the steel making plants and countermeasures for its causes are carried out. Several typical technologies to prolong spherical roller bearing life and to improve other types of rolling bearing are described.

1 はじめに

製鉄所設備では、軸受をはじめとして多種・多数の機械要素部品が組み込まれている。機械要素部品は駆動系設備に使用されるため、1個の機械要素の故障が製造ライン全体を停止させる。

Fig. 1 に 1998 年度の水島製鉄所・保全部門所管の設備故障を機械要素別に故障件数比率と設備停止時間比率で整理した実績を示す。軸受は件数でワースト 5、設備停止時間ではワースト 1 に位置する。軸受トラブルを要因別と軸受形式別に件数比率で分類した結果を Fig. 2 に示す。設備管理で予防すべき範疇のトラブル以外では、スラスト荷重による破損が約 1/4 を占め、次いで熱による軸受本体の焼き戻し・軟化やグリスの酸化・固化、ころのスキュー（軸受挙動）、振動衝撃や軸伸縮吸収部での機械的拘束などによる過負荷、異物や水の浸入による潤滑不良、密封軸受のグリス枯渇の順で続く。軸受形式別に分けると自動調心ころ軸受が 40% 以上を占め、円筒ころ軸受、深溝玉軸受が 20% ずつである。

また、ロールネックベアリング用転がり軸受では、油膜軸受に比べて油膜が薄くなるため、異物や水分の影響を受けやすくなり、回転が高速であることも相まって焼き付き性の故障がたびたび発生し

ている。

本報告ではスラスト荷重作用環境下での自動調心ころ軸受の静的挙動と動的挙動に焦点を当て、その弱点を補う新規軸受の開発、および外的起因の損傷排除のための軸受内潤滑清浄化技術について紹介する。

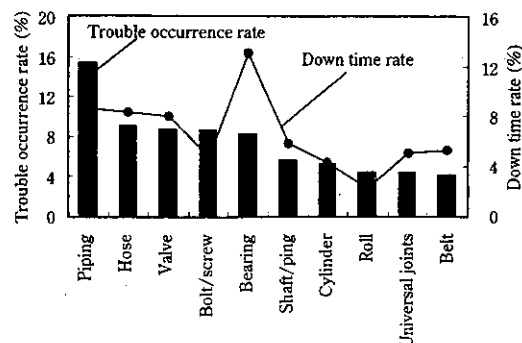


Fig. 1 Actual trouble occurrence classified by mechanical parts (from 1998/4 to 1999/3)

* 平成12年10月31日原稿受付

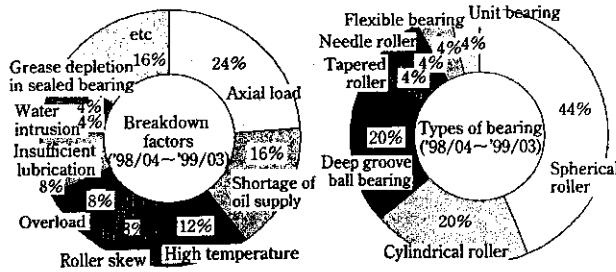


Fig. 2 Classification of bearing trouble

2 自動調心ころ軸受の問題点と新型軸受の開発

2.1 自動調心ころ軸受の問題点の分析と適用基準

Fig. 3 に自動調心ころ軸受の代表的な2形式を示す。近年、ころ径の拡大による負荷容量のアップとスラスト荷重作用下でのエッジロード発生防止を目的として対称ころ型が主流となりつつある。

スラスト荷重作用下での両方式の違いは、非対称ころ型では内輪の案内つばでころの姿勢が拘束され、主に外輪ところエッジ部間でエッジロードが発生するというものである。たとえば、Photo 1 に非対称ころ型で片列のみフレッキングが発生し、その後異常摩耗を起こした外輪の損傷状況を示すが、損傷はころエッジ部に相当する位置に集中している。そこで、対称ころ型と非対称ころ型の特性差を面圧分布で評価することを試みた。解析は、ラジアル荷重とスラスト荷重が作用した条件下での2次元FEMによる近似解析である。

解析時のころの各コーナー部と接触する内外輪の応力照査点をFig. 4に、スラスト荷重比率による各応力観測点でのVon Misesの応力変化をFig. 5, 6に示す。Fig. 5より対称ころ型ではスラスト荷重比率に応じて接触応力は直線的に増加し、ラジアル荷重の大きさによっても傾向的な差はない。これは、対称ころ型ではスラスト荷重比率が上がってもころと内外輪軌道が面接触状態を維持していることを意味する。逆に、Fig. 6(b)より非対称ころ型ではラジアル荷重が小さい場合は、楔効果によるころ中央側への接触域の拡大と応力の均一化の方向で変化していくために、各コーナー部の応力変

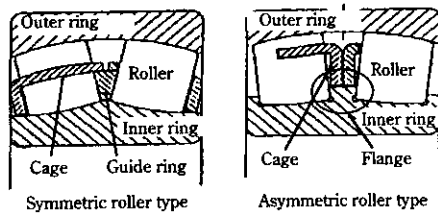


Fig. 3 Prototype of spherical roller bearing

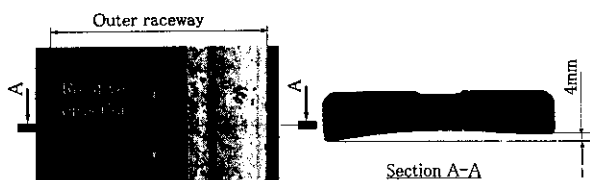


Photo 1 Example of damaged asymmetric roller type bearing under axial load working

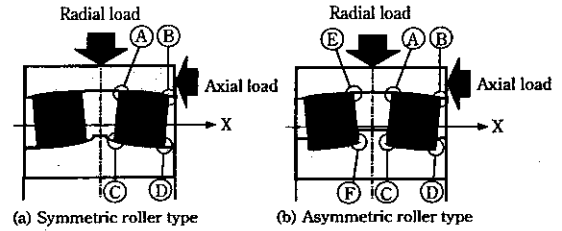


Fig. 4 Observation point of contact stress variation

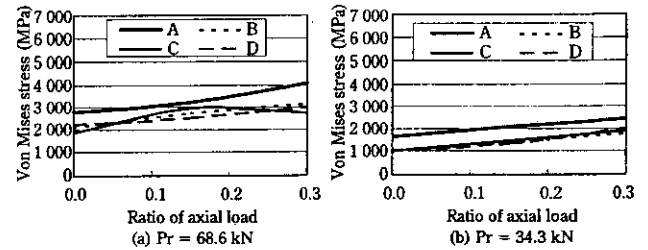


Fig. 5 Contact stress of symmetric roller type

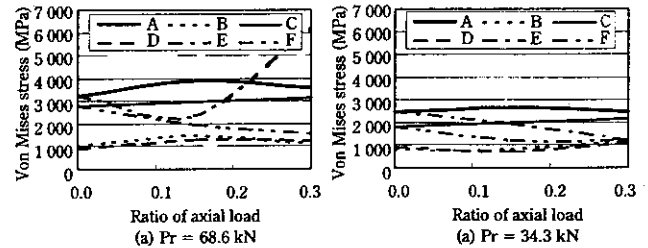


Fig. 6 Contact stress of asymmetric roller type

Table 1 Rules on the selection about spherical roller bearing

		Magnitude of radial load (Cor/Pr)	
		≤10	>10
Ratio of axial load (Pa/Pr)	<0.3	Symmetric roller	Symmetric roller
	≥0.3	Symmetric roller	Asymmetric roller

Pr: Radial load Pa: Axial load Cor: Basic static load rating

化は小さい。ところが、Fig. 6 (a) に示すように、ラジアル荷重が大きい（つまりスラスト荷重の絶対値が大きい）と案内つば部でのころ姿勢の拘束によって、外輪側E点で局部的にエッジロードが発生し始める。すなわち、スラスト荷重の絶対値が大きい場合には均一な面圧分布を維持できなくなることを意味している。また、非対称ころ型は対称ころ型に比べてころ径が小さいことも相まってラジアル荷重の場合でも接触応力は高く、非対称ころ型が有利と言えるのは低ラジアル荷重、高スラスト荷重比率の場合のみと考えられる。

以上のことから、スラスト荷重作用環境下での各形式の使い分け基準をTable 1のように制定し、運用を開始している。

2.2 自動調心ころ軸受の挙動安定化

自動調心ころ軸受は、接触中心に対して不均等な面圧分布になると、ころと外輪、ころと内輪の間に作用する摩擦モーメントのバランスが崩れ、スキュー現象が現れる。スキューが始まると接触部での滑り、保持器や案内つばとの接触によるモーメントが作用し、その状態でバランスを回復して安定する (Fig. 7 (a))。また、面圧分

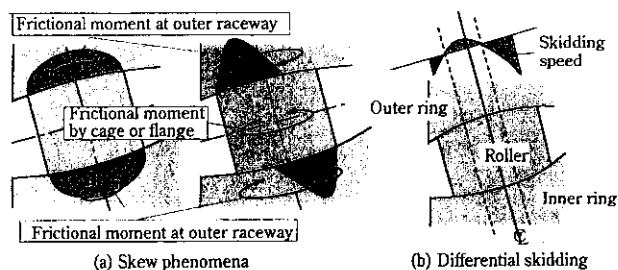


Fig. 7 Roller behavior of spherical roller bearing

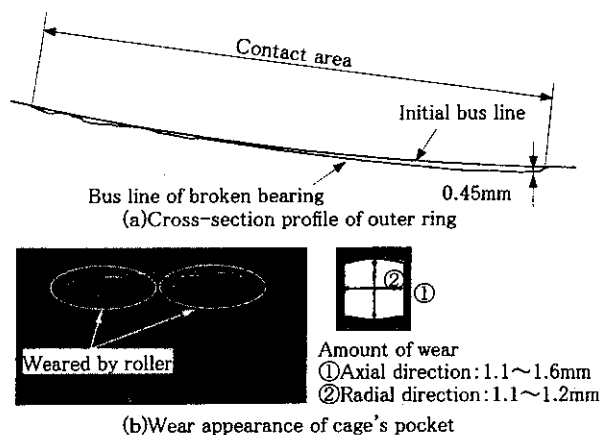


Photo 2 Example of damaged bearing by skew skidding

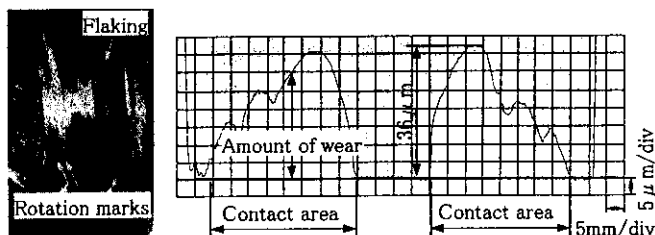


Photo 3 Example of damaged bearing by skew skidding

布が均等でもころと内外輪軌道との周速差により、2ヶ所の等速点を除いて常時相対滑り（差動滑り）状態となっている（Fig. 7 (b)）。これらの挙動上の問題は、自動調心ころ軸受の構造上避けることができない。しかし、スキューモーメントの駆動力は油膜が介在した中での接触面での摩擦力であり、摩擦力が小さい限り害害となって現れにくい。また、差動滑りの影響が摩耗量として現れるのも、油膜形成の不十分な場合のみである。

Photo 2、3の損傷例は、自動調心ころ軸受の構造上の欠点に起因したものと考えられる。前者は0→150→0rpmの正逆転運動が約10sサイクルで繰り返され、後者は1~2rpmの極低速で連続回転され、油膜の形成が不十分な条件で使用される点で共通している。

そこで、油膜厚さによってころの挙動の影響を実験的に再現することを試みた。結果をFig. 8に示す。Fig. 8 (a)は、Co/P=2、回転数10rpm、軸受箱温度100°Cという0.01μm程度の油膜厚さしか期待できない極度な境界潤滑領域で350h運転した後の自動調心ころ軸受#23022の外輪母線形状を示すが、まだころエッジ部の摩耗しか観察されない。しかし、同じ運転条件で3minに1回10s停止して高頻度で強制的に油膜なしの条件を与えると、Fig. 8 (b)のような2ヶ所の等速点以外が摩耗する傾向が顕著に現れてくる。ス

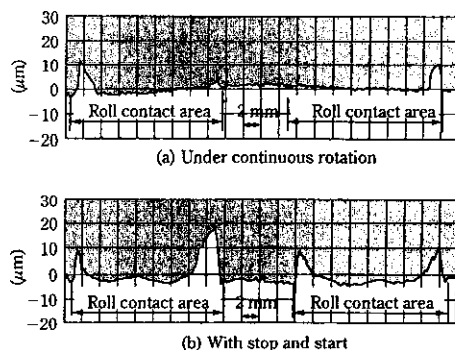


Fig. 8 Wear profile of under typical boundary lubrication

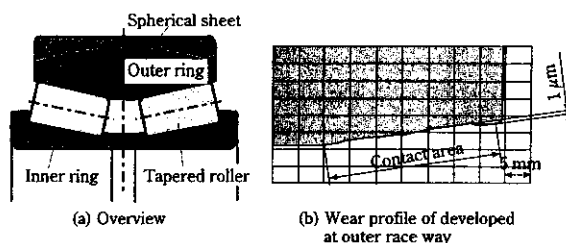


Fig. 9 Double row tapered roller bearing with spherical sheet

キューについても原理は同じで、軌道面や案内つばところの接触部の摩擦力が大きくなる場合に顕著な現象と考えられる。

以上のことから油膜の十分形成されない条件での自動調心ころ軸受の構造的な問題を回避する軸受として、調心機能付円錐ころ軸受と耐スラスト型複合ころ軸受を開発した。

2.2.1 調心機能付円錐ころ軸受の開発

スキューモーメントや差動滑りを構造的に回避するには、円筒ころや円錐ころのような完全線接触型へ変更することが不可欠である。特に、スラスト荷重を受けるロールの位置決め固定側に使用する場合は、スラスト荷重をころと案内つばの滑り接触部だけでなく、軌道面ところの面間の競りでも負担できる分だけ円錐ころ型が有利である。また、傾き吸収機構を実現するには、軸受外部に球面座が必要である。以上のことから、Fig. 9 (a)に示す複列円錐ころ軸受¹²⁾を開発した。

Fig. 9 (b)はPhoto 3の自動調心ころ軸受と同部位で同期間使用した後の開発軸受の外輪母線形状を示す。摩耗量の大幅削減と均一化が達成できた。摩耗が均一であれば、スキューの起点となる不均一な面圧分布や滑りの問題も回避できるため、スキューに対しても同様の効果が期待できる。

2.2.2 耐スラスト型複合ころ軸受の開発

円筒ころ軸受は、接触角を持たないためにラジアル荷重とスラスト荷重を別個の部位で負担でき、接触面に両者の複合荷重が作用しないという点で寿命上有利な軸受である。また、エッジロードの問題を除けばころ全長に渡って均一な面圧分布を得られやすく、同じ転動体荷重で低面圧化する上でも有利である。

逆に、円筒ころ軸受はころの公転軸が定まらないため、摩擦モーメントのアンバランスが生じると容易にスキュー現象が発生する。特に、スラスト荷重をころ端面と案内つば部の滑り接触部で負荷するため潤滑面で不利であり、この部分で摩擦モーメントのアンバランスが生じやすく、ころがスキューした結果、外輪ところの間のエッジロードを助長したり、案内つばの欠損を生じさせる原因となる。

円筒ころ軸受の長所を生かし、短所を克服する軸受として Fig.

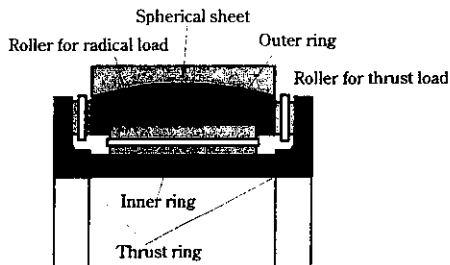


Fig. 10 Complete rolling bearing for both radial and thrust load

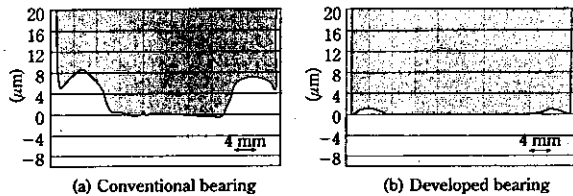


Fig. 11 Wear profile at outer raceway

10に示す耐スラスト型複合ころ軸受³⁾を開発した。

Fig. 11は同期間使用後の球面座付円筒ころ軸受と開発軸受の外輪母線形状を示すが、エッジ部の摩耗が著しく低減できている。両者にはころのクラウニング形状に差はないことから、スキューの低減効果であると考えられる。

3 外乱要因排除と油脂適正化による長寿命化

3.1 極低速回転での軸受清浄化技術

3.1.1 グリスエア給脂システムの開発

極低速回転、高負荷荷重の条件では、ころと内外輪の接触部は金属接触を生じる境界潤滑状態である。境界潤滑領域では、油膜形成の十分な流体潤滑に比べて寿命は大幅に低下するが、連続鋳造機などの実機においては、軸受内への水、異物混入、軌道面の摩耗によってさらに軸受損傷が加速される。そこで、シール改善による軸受寿命延長技術を開発した。

Photo 3やFig. 8に示したように、自動調心ころ軸受では油膜形成が不十分な場合に外輪軌道面に偏摩耗を生じ、摩耗の少ない凸部を起点としてフレーキングが発生する。特に、グリス中に水分が混入することにより摩耗量は増加し、凸部への応力集中も一層顕著になる。実機では、グリス中に1.8~9.6%程度の水分が混入するケースがあり、自動調心ころ軸受においてはグリス中への水分混入量を最小限に抑えることが必要となる。

一方、円筒ころ軸受のフレーキングは、軌道面に生じた大圧痕近傍から発生する場合もある。圧痕は、軸受自身の摩耗粉、外部から侵入した異物噛み込みによって発生するが、早期フレーキングに影響を及ぼすのは直径の大きい後者である。よって、円筒ころ軸受の寿命延長のためには外部からの異物侵入をいかに抑えるかが重要となる。

以上のことから、軸受内への水・異物混入防止を目的として、2重に配置したシール間に清浄空気を供給し弱正圧に保持するグリスエアシステム⁹⁾を開発した(Fig. 12)。このシステムは、シール間の排出エアによりシール冷却を行い、軸受内負圧発生時には清浄空気を吸い込むことによって外部からの水・異物の侵入を防止する。

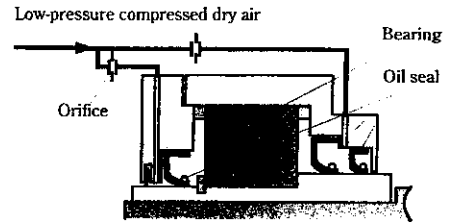
Fig. 12 Diagram of grease air system⁹⁾

Table 2 Result of grease analysis

	Water content (wt%)	Debris content (wt%)
Conventional	1.8~9.6	0.44~1.98
Grease air system	<0.01	0.07~0.13

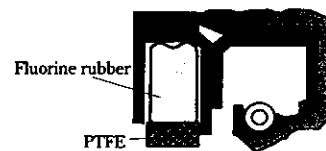


Fig. 13 Face contact PTFE seal

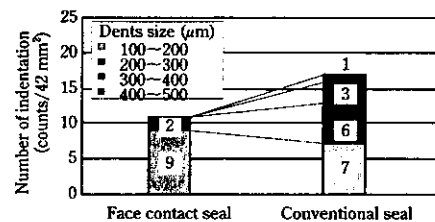


Fig. 14 Comparison of dents size on outer raceway

Table 2に示すように、グリスエア給脂で使用した場合のグリス中の水分・鉄分濃度は大幅に減少し、外部からの水・異物侵入防止効果が高いことを示している。

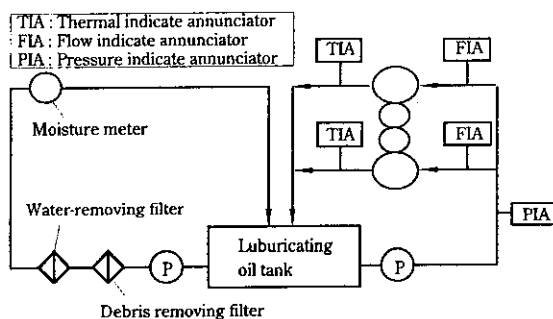
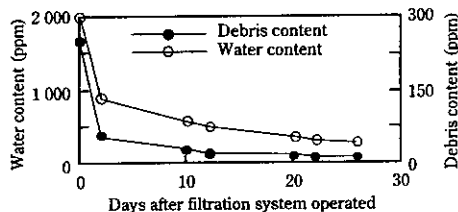
3.1.2 面接触シールの適用

オイルシールによるシール性能向上策として、従来より多重シール化やシール材質変更など試みてきた。しかし、熱、摩耗、永久変形などシールゴム自体の劣化で締め代が低下し、シール性能の大幅な向上は達成できなかった。そこで、Fig. 13に示すPTFE製の面接触シールの適用を試みた。PTFEは、ゴムの中で最も耐熱温度の高いフッ素ゴムよりも、さらに高温(220°C)まで使用でき、熱硬化やへたりを生じないため、これをシールの摺動部に用い、かつ面接触とすることにより長期にわたり外部からの異物侵入抵抗を大幅に改善することができる。

Fig. 14に、連続鋳造機のガイドロール用軸受で外輪軌道面に圧痕を生じた軸受の個数比率を示すが、面接触シールでは200μm以上の圧痕個数が大幅に減少しており、異物による軌道損傷をサイズ、個数の両面で低減可能となった。また、X線回折装置による半価幅減少量の測定結果からも、従来比2.7倍の寿命延長が可能であることを確認した。

3.2 高速回転での潤滑技術・清浄化技術

圧延機では高精度と高速圧延を両立させることが、極めて重要な

Fig. 15 Lubrication system for bearings of backup rolls⁵⁾Fig. 16 Transition of lubricant purity⁶⁾

課題である。当社主力ぶりきミルでは、まずバックアップロールを油膜軸受から転がり軸受に変更して板厚精度を向上させたが、さらに高速化をも達成しようとする、軸受の使用環境を整え信頼性を向上させる必要があった。そのため、設備状態監視の強化や潤滑油の清浄化システムを構築した。

Fig. 15 にバックアップロール用軸受潤滑システムの系統図を示す⁵⁾が、給油量を保証するために軸受毎に流量計を設置し、潤滑油の戻り温度も軸受ごとに測定し、発熱などの異常がないかをオンラインでモニタリングするシステムとした。

一方、バックアップロールの軸受箱には圧延油やロール冷却水が大量にかかることから、潤滑システムへの水分や異物の混入が懸念され、軸受の信頼性を向上させるために異物除去フィルターや水分除去フィルターを設置し、潤滑油の清浄化を図った。Fig. 16 にフィルター適用後の潤滑油の清浄度を示す⁶⁾が、異物濃度 20 ppm 以下、水分濃度 500 ppm 以下を達成した。

一方、バックアップロールの高速化にともない、シールの耐摩耗性が重要となる。そこで、従来の軸シールのみの構造を見直し、Fig. 17 に示すスケール、中間、軸の 3 段階シール構造⁷⁾を開発した。また、シール材質はフッ素ゴムを採用し、シールと摺動する軸側のフィレットリングには硬質クロムめっきを施し、耐摩耗性を持

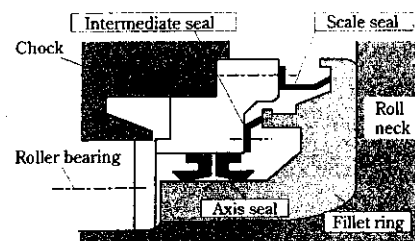


Fig. 17 Structure of seals in roller bearing of backup roll

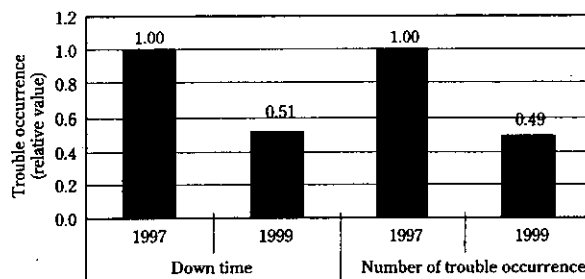


Fig. 18 Performance of bearing stabilization and life prolongation activity

たせた。⁷⁾

以上のバックアップロールの潤滑油清浄化技術とシール技術以外に、ワークロールでの高 PV グリスの開発⁸⁾や補助ロールのオイルエアー潤滑化を行い、圧延速度を従来の 2260 m/min から世界最高速の 2800 m/min にまで引き上げることに成功した。⁸⁾

4 おわりに

軸受に関する損傷要因はさまざまであり、安定化、長寿命化への効果が高い要因から優先的に改善に取り組んだ。その結果、1999 年度の軸受関係の故障は、活動開始前の 1997 年度実績に比べて時間、件数ともに約半減した (Fig. 18)。また、高精度、高速圧延を両立させた主力ブリキミルでは、転がり軸受化して 7 年以上経過したが、フレーキングなどのトラブルもなく安定的に使用できている。

本報に記載した各軸受の開発、実験データの採取に御協力いただいた NTN(株)、光洋精工(株)、日本精工(株)の軸受メーカー 3 社に対して謝意を表する。

参考文献

- 1) 伊崎健太, 後藤信孝, 鈴木三千男, 久保富次郎: トライボロジー会議予稿集, (2000)5, 311~312
- 2) 川崎製鉄(株), 日本精工(株): 特開平 10-220467
- 3) 川崎製鉄(株), NTN(株): 特願平 11-334117
- 4) 川崎製鉄(株): 特開平 8-004776
- 5) 瀧本高史: 第 9 回トライボロジー研究会 (1998), 1-8
- 6) 岡本 謙, 松本正次, 川島浩治, 斉藤輝弘, 高橋秀人: 材料とプロセス, 8(1995), 1264

- 7) 岡本 謙, 竹沢幸平, 斉藤輝弘: 「基礎潤滑設計に関する問題と改善事例」, 日本機械学会, No. 940-49, 81-84
- 8) T. Saito, K. Hamagami, T. Kaneko, K. Kawashima, K. Takezawa, and T. Chonan: Journées Siderurgiques Internationales, Paris, 08-09 (1999) Dec, 52~53