

分割型旋回座軸受の開発

Development of Split Type Slewing Rim Bearings

蔵下義一 Y. KURASHITA

Underground development using tunnel boring machines has become vital for urban development. In recent years, the size of slewing rim bearings tends to become larger with the increase in tunnel construction of large bores. Consequently, development of split type slewing rim bearings became necessary because integral type bearings can not be transported to the construction sites in cities. Moreover, split type bearings are also used for smaller size tunnel boring machines in order to make it easy to retrieve from the tunnel for reuse. The application of split type slewing rim bearings has been applied for further application, such as melting furnaces.

Key Words: slewing rim bearing, split, tunnel, tunnel boring machine, melting furnace

1. はじめに

都市の地下には鉄道，道路，地下河川，下水道，電力などのトンネル工事が盛んに行われている。すでにある埋設物，地上の道路，橋りょう，ビル，住宅などに影響を与えないでトンネルを掘削する方法として，シールド工法があり，そのトンネル掘進機の回転部には旋回座軸受が使用されている。

近年，直径が10mを超える大口径のトンネル工事が増えてきた。それに用いられる旋回座軸受も大型化した。一体型軸受では都市部への運搬ができないため，分割型旋回座軸受の開発が必要となった。

今回Koyoの開発した分割型旋回座軸受が実機にて使用され，その優れた性能が実証された。以下にその特長と評価方法などについて紹介する。また，この分割型旋回座軸受はトンネル掘進機以外にも使用されたので，あわせて紹介する。

トンネル掘進機用旋回座軸受は以下の特長を有する。

カッタヘッド駆動のため外輪外径面または内輪内径面のいずれか一方に歯切り加工(歯車)が施されている。

内，外輪には取付け穴が設けられ，軸受をボルトで直接フレームに取り付けることができる。

シール付密封軸受では，給排脂または給排油穴が設けられている。

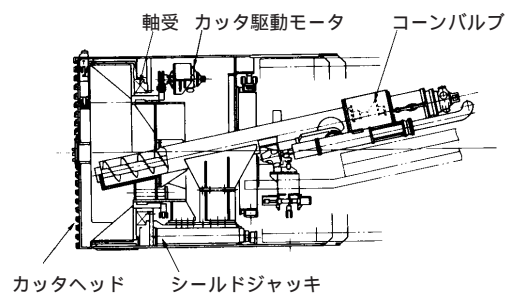


図1 土圧式掘進機

Pressure holding shield machine

2. シールド工法

シールド工法には，手掘り工法，機械工法がある。近年では機械工法が大半を占めており，なかでも，補助工法を前提としない密閉式機械シールド工法が90%以上を占めている。表1に3種類の密閉式機械シールド工法比較を示す。また，図1～4に工法別の代表的な掘進機の構造を示す。

3. トンネル掘進機用旋回座軸受

表2にトンネル掘進機に使用されている旋回座軸受を示す。旋回座軸受の形式は大別して3種類に分類される。

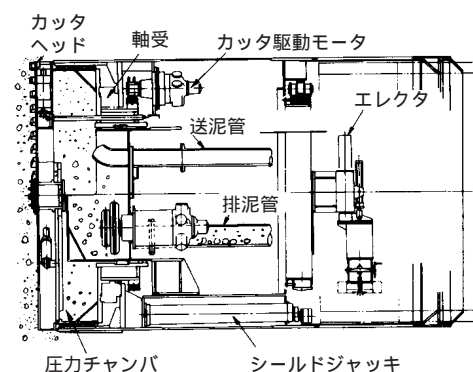


図2 泥水加圧式掘進機

Pressurized slurry shield machine

表1 密閉式機械シールド工法比較
Comparison of mechanized shield tunneling

項目	土圧式	泥水加圧式	泥土圧式	
概略構造	<p>スクリュコンベア(軸付) カッタドラム れき れき ベルトコンベア</p>	<p>送泥 れき選別炭 排泥</p>	<p>リボンスクリュ れき 正面ゲート 泥漿注入 ベルトコンベア</p>	
構造	掘削	回転カッタ	回転カッタ	回転カッタ
	排土	スクリュディスチャージャ +ベルトコンベア	汚泥輸送	リボンスクリュ +ベルトコンベア
	圧力保持体	掘削土砂	泥水と泥水圧	塑性化された掘削土砂
	切羽安定	掘削土砂の排土管理	泥水密度と泥水圧管理	泥漿濃度と排土管理
適用土質	(粒度分布) 巨礫	20mm以下	ディスクカッタで一次破砕できる 礫径(シールド径にもよるが, 400~500mm)	泥水加圧式と同じ
	細粒子分 透水係数	20%以上 $10^{-4} \sim 10^{-5}$	10%以上 10^{-2} 以上	極少でも対応可 10^{-1} 以上
	含水比	30%以上	地下水位以下であれば限定なし	土圧式に準ずる
	間隙水圧	細粒子分比率による。砂質土では $0.5\text{kg}/\text{cm}^2$ 以下	シールド材の耐久性に関連するが 通常 $5 \sim 6 \text{kg}/\text{cm}^2$	削土の改良度合いによるが実験で は $1.2\text{kg}/\text{cm}^2$ まで可
	(土の硬さ) N値	0~10	最高 $10\text{kg}/\text{cm}^2$ 程度 0~50	0~50
	内部摩擦力 粘着力	0~30(砂) $0.4\text{kg}/\text{cm}^2$ 以下	0~45° 特に制限なし	0~45° 土圧式に準ずる
原理	掘削土をカッタチャンバに充填させ、このチャンバ内土圧を管理しながら掘進量と排土量をバランスさせる。	泥水圧の作用で切羽に泥膜、あるいは泥水の浸透濾過を形成させ、切羽を安定掘削する。	土圧式と同様である。細粒子分を人工的に添加し、流動性と不透水性を有した削土に改良する。	
特長	長所	<ul style="list-style-type: none"> ・カッタディスク回転により、砂質土と粘性土を混合かくはんし流動性と止水性を帯びたものにする。 ・排土は圧送ポンプでパイプ輸送も可 	<ul style="list-style-type: none"> ・クローズドシステムであり、高水圧下でも坑内での噴発はない。 ・カッタディスクは常に泥水という潤滑材に接しており、摩耗が少なく、またカッタトルクも少なくてすむ。 ・排土は流体輸送であるので、カーブ掘進等でも融通がきく。 	<ul style="list-style-type: none"> ・透水性の高い砂礫土でも高濃度泥水を効率よく添加できれば切羽安定掘削ができる。 ・土圧式の適応土質範囲を拡大できる。
	短所	<ul style="list-style-type: none"> ・土被りが浅い場合、土圧制御および裏込注入などの不具合が地表面の隆起陥没の形で現われやすい。 	<ul style="list-style-type: none"> ・透水性の高い地盤では逸泥が生じ、有効泥水圧が作用しにくくなり切羽が不安定となる。 	<ul style="list-style-type: none"> ・高トルクを必要としカッタピット、カッタディスクの摩耗が激しい。 ・カッタチャンバ、スクリュ内が不透水性の改良土で充填されない場合圧力保持が難しく噴発の危険もある。

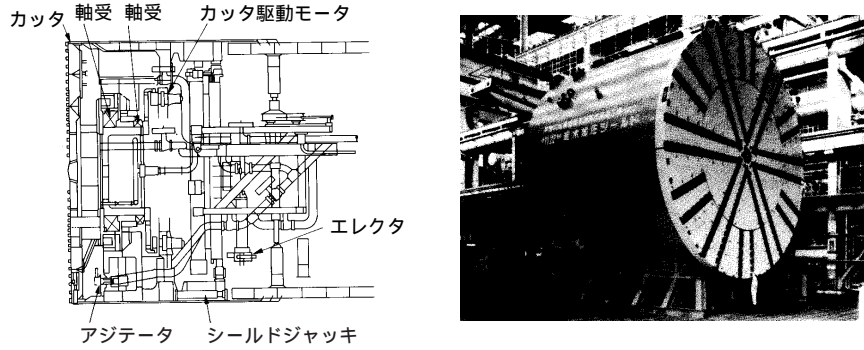


図3 大型泥水加圧式掘進機 (11.22m)
Large size pressurized slurry shield machine (11.22m)

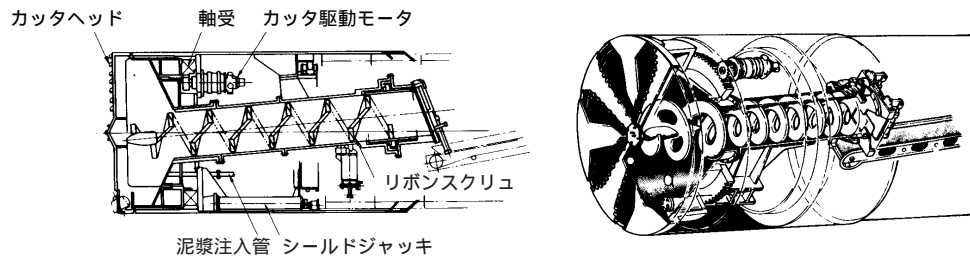


図4 泥土圧式(泥漿式)掘進機
Slime shield machine

表2 旋回座軸受の構造と特長
Structure and feature of slewing rim bearings

型 式	構 造 例	特 長
単 列 ボール形 (THタイプ)		<ul style="list-style-type: none"> ・THタイプは、4点接触形のアンギュラスラスト玉軸受の内部構造になっており、内輪・外輪の軌道面がふたつの円弧からなり、玉は一列に配置されている。アキシャル荷重、ラジアル荷重およびモーメントなどの合成荷重を同時に負荷することができる。 ・小型掘進機で比較的軽掘削に使用。
複 列 円すいころ形 (2TRタイプ)	(内歯付き) 	<ul style="list-style-type: none"> ・2TRタイプは、接触角45°の超急勾配を採用し、非対称の軌道および円すいころの構造により、アキシャル荷重負荷側の負荷能力の増強を図っている。 ・内外輪いずれかの軌道輪は普通焼入れを採用し、信頼性の向上を図っている。 ・高速、重掘削、岩盤用にも使用
三列複合 円筒ころ形 (DTRタイプ)	(外歯付き) 	<ul style="list-style-type: none"> ・DTRタイプは、内輪または外輪のいずれか一方を二つ割りにした三個の軌道輪および三列のころを組み合わせた構造となっている。一列のころはラジアル荷重のみを負荷させ、他の二列のころのうち一列には、モーメントとアキシャル荷重を負荷させ、残りの一列はモーメントのみを負荷させる設計となっており、剛性が非常に高い軸受構造である。 ・小型から超大型の掘進機に広く使用され、最も一般的な形式である。
	(内歯付き) 	

4. 分割型旋回座軸受の分割・締結方法

図5に示すように軸受の軌道輪は、軸方向の中心線に垂直な面で二もしくは四分割される。

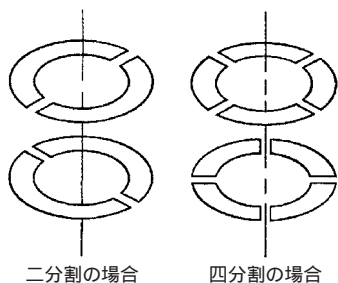


図5 分割型旋回座軸受の分割・締結方法

Splitting and fixture method of split type slewing rim bearings

分割された軌道輪は軸方向の上下分割輪のそれぞれの円周方向分割面の位相をずらして、六角穴付ボルトで締結される。その位相のずれ(θ)は次式で求めることができる。

$$\theta = 180^\circ / X \quad X : \text{円周方向の分割数}$$

例として四分分割型三列複合円筒ころ軸受の分割方法を図6に示す。

歯車輪と外輪および内輪Aと内輪Bのそれぞれの分割面は円周方向に位相を45°ずらして、六角穴付ボルトにて締結する。

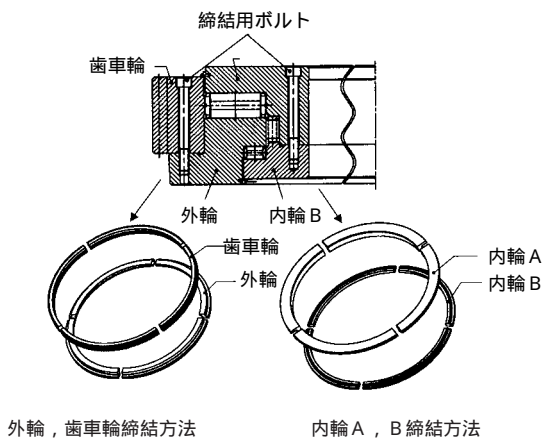


図6 四分分割型三列複合円筒ころ軸受の分割方法

A method to split 3 row cylindrical roller bearings for 4 split slewing rim bearings

5. 分割型旋回座軸受の評価方法

表3に分割型旋回座軸受開発時の評価方法を示す。

表3 評価方法
Evaluation method

評価項目	評価方法
寿命	ミニチュアモデル試験, 実機評価
振動(回転性能)	ミニチュアモデル試験, 実機評価
運転温度	ミニチュアモデル試験, 実機評価
剛性	ミニチュアモデル試験, FEM, 実機評価

6. 分割型旋回座軸受のミニチュアモデル試験

ミニチュアモデルによる性能試験結果を以下に示す。

6.1 二分分割型と一体型の性能比較試験

表4および図7に試験軸受を示す。

表4 試験軸受
Test bearings

		二分分割型	一体型
軸受呼び番号		SP/DTR577	DTR577
主寸法, mm		内径: 577 / 外径: 700 / 幅: 56	
動定格荷重, kN	スラスト列	280	293
	反スラスト列	101	103
	ラジアル列	50.9	52.2
静定格荷重, kN	スラスト列	1060	1130
	反スラスト列	407	422
	ラジアル列	92.8	96.1

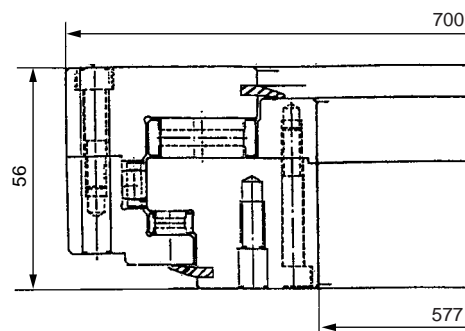


図7 試験軸受
Test bearings

6.2 試験機構造

図8, 図9に試験機の構造と外観を示す.

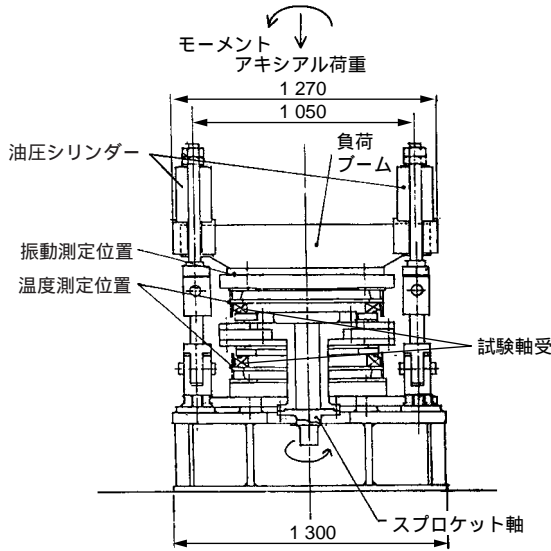


図8 試験機構造
Structure of test machine



図9 試験機外観
Appearance of test machine

6.3 試験方法

試験機に試験軸受2セットを上下対称に組み込む。軸受の内外輪取付架台はトンネル掘進機を模したものである。試験軸受には、上部負荷ブームに取り付けた2個の油圧シリンダーにてアキシャル荷重とモーメントを同時に負荷する。回転は、試験軸受の内輪に取り付けたスプロケット軸をチェーンで駆動して与える。試験中、外輪取付架台の外径温度と振動を測定する。

6.4 試験条件

表5に試験条件を示す。

表5 試験条件
Test conditions

		条件1	条件2	条件3
荷重	アキシャル荷重, kN	147	216	
	モーメント, kN・m	44	20	
動等価荷重, kN		355	311	
回転速度, min ⁻¹		7.5	12	20
時間割合, %		5	27	68
平均動等価荷重, kN		314		
平均回転速度, min ⁻¹		17.2		
試験での回転数		10.8 × 10 ⁴ 回転	55.3 × 10 ⁴ 回転	142.3 × 10 ⁴ 回転
試験での回転時間, h		240	768	1857
試験での総回転数 / 総回転時間		208.4 × 10 ⁴ 回転 / 2865h		
計算寿命 (回転数/時間)	二分割型	6.82 × 10 ⁴ 回転 / 661h		
	一体型	79.4 × 10 ⁴ 回転 / 769h		

計算寿命はスラスト列の値

6.5 試験結果

図10, 図11に寿命試験後の軌道分割部と、ころ転動面の外観を示す。



図10 軌道分割部
Raceway split section



図11 ころ転動面
Rolling surface of roller

寿命試験結果は計算寿命に対して、二分割型で4.3倍、一体型で3.7倍の時点で打ち切ったが、いずれの軸受内部にも異常は認められなかった。

図12に軸受の昇温を示す。二分割型，一体型での差は認められない。

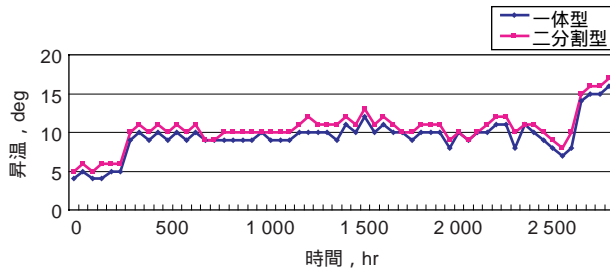


図12 軸受の昇温
Temperature rise

図13に回転時の軸受振動を示す。二分割型，一体型での差は認められない。

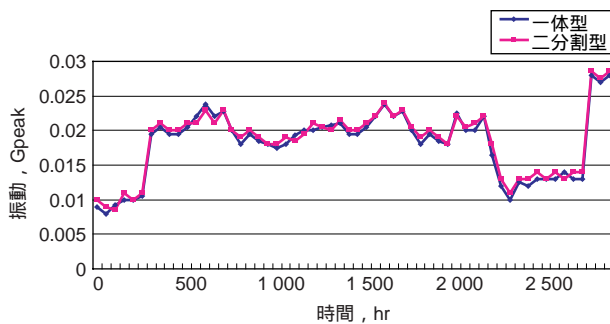


図13 回転時の軸受振動
Bearing vibration at rotation

図14に剛性(外輪のたわみ角)を示す。二分割型，一体型での差は認められない。

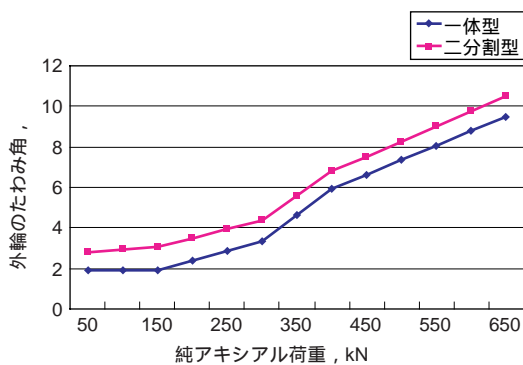


図14 剛性(外輪のたわみ角)
Rigidity (deflection angle of outer rings)

7. 分割型旋回座軸受のFEM解析

実機相当サイズの軸受でのFEM解析を行った結果を下記に示す。

二分割型と一体型のFEM解析
表6にFEM解析軸受を示す。

表6 FEM解析軸受
Bearing used for FEM analysis

	二分割型	一体型
軸受呼び番号	SP/DTR2350	DTR2350
主寸法, mm	内径: 2350 / 外径: 3036 / 幅: 300	
静定格荷重, kN	スラスト列	7740
	反スラスト列	3590
	ラジアル列	1660

FEM解析条件

- 解析は外輪の1/4モデルを作成し端部境界条件を変えることにより二分割型と一体型の比較を行う。
- 荷重は実機におけるアキシャル荷重を想定し，側輪上の表面の9.8MPaの面荷重を負荷する。(総荷重10560kN)

材料定数 縦弾性係数: $E = 206\,000\text{MPa}$,
ポアソン比: $\nu = 0.3$

FEM解析結果

図15～18，表7にFEM解析結果を示す。

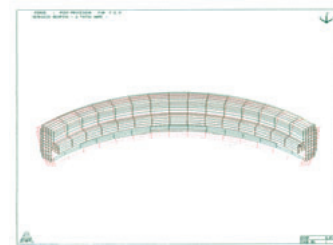


図15 FEM解析(二分割型・変位)
FEM analysis (2 split type deformation)

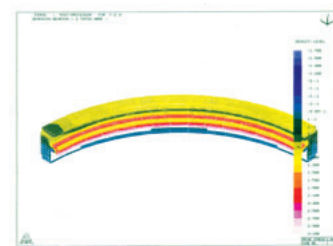


図16 FEM解析(二分割型・応力分布)
FEM analysis (2 split type stress distribution)

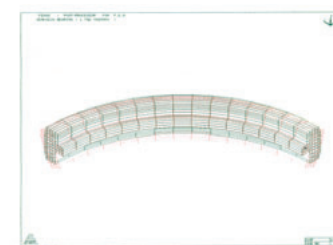


図17 FEM解析(一体型・変位)
FEM analysis (integral type deformation)

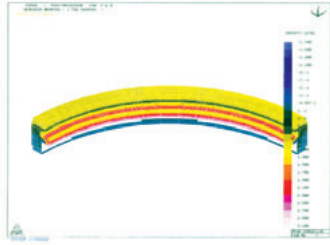


図18 FEM解析(一体型・応力分布)
FEM analysis (integral type stress distribution)

表7 FEM解析結果
FEM analysis results

	二分割型	一体型
最大変位, mm	0.097	0.096
最大主応力, MPa	28.9	28.6

以上の結果より、軸受取付側の剛性が十分であれば二分割型と一体型の剛性には、ほとんど差がないことがわかった。

8. 分割型旋回座軸受の実機評価品

8.1 評価軸受

呼び番号：SP / DTR2200TAG
形式：二分割型三列複合円筒ころ軸受
主寸法，mm：内径 2 200 / 外径 3 120 / 幅 390

8.2 実機での工事概要

使用箇所：土圧式掘進機
トンネル径：約 6 m
掘削距離：約220m

8.3 掘削完了後の軸受外観

図19，図20に掘削完了後の軌道分割部ところ転動面の外観を示す。

掘削完了後の軸受を調査した結果、軸受外観上はく離などの損傷もなく良好であった。

また、精度も良好であった。

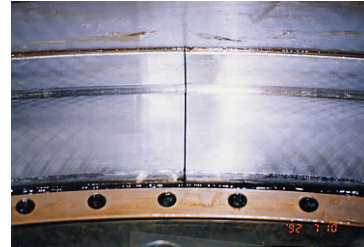


図19 軌道分割部
Raceway split section

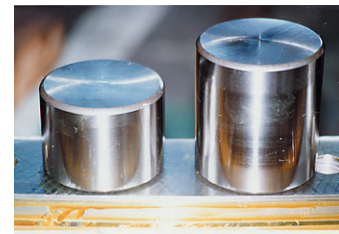


図20 ころ転動面
Rolling surface of roller

9. 分割型旋回座軸受の納入実績

表8に分割型旋回座軸受の納入実績を示す。

表8 分割型旋回座軸受の納入実績
Delivery records of split type slewing rim bearings

使用機械	各軌道輪の 円周方向分割数	呼び番号()	主寸法, mm 内径 / 外径 / 幅	歯 車				質量, kg
				外歯	内歯	モジュール	歯数	
トンネル 掘進機	2	SP / DTR2200TAG	2 200 / 3 120 / 390			20	154	9 000
	4	SP / DTR2020ATAG	2 020 / 2 950 / 400			25	116	8 700
	4	SP / DTR4430TAG	4 430 / 5 550 / 410			25	220	22 100
	4	SP / DTR4860TAG	4 860 / 6 050 / 450			25	240	28 000
	4	SP / DTR5060TAG	5 060 / 6 250 / 450			25	248	29 100
	4	SP / DTR5060TAG - 1	5 060 / 6 300 / 450			30	208	29 800
	4	SP / DTR5060TAG - 2	5 060 / 6 250 / 450			25	248	30 000
	4	SP / DTR5790TAG	5 790 / 7 140 / 535			30	236	45 800
下水道用 トンネル 掘進機	2	SP / TH663	663 / 920 / 145			10	68	227
	2	SP / TH703	703 / 1 000 / 155			10	72	307
	2	SP / TH891	891 / 1 240 / 165			12	76	502
立坑構築機	2	SP / TH4230	4 235 / 4 796 / 220			22	216	4 940
溶融炉	4	SP / TH7690	7 690 / 8 372 / 320			26	320	14 800

SP / : 分割型, DTR : 三列複合円筒ころ形, TH : 単列ボール形

表8に示すように近年ではトンネル掘進機以外の使用機械(溶融炉)にも分割型旋回座軸受が採用されてきた。

10. 分割型旋回座軸受の実機使用例

10.1 トンネル掘進機用旋回座軸受

形式：四分割型三列複合円筒ころ軸受

呼び番号：SP / DTR5790TAG

使用箇所：地下調整池トンネル掘進機

トンネル径：約 13m

掘削距離：約2.5km(貯留量：30万m³)

掘削深さ：40m以上

図21～23に軸受断面，軸受外観，軸受内部を示す。

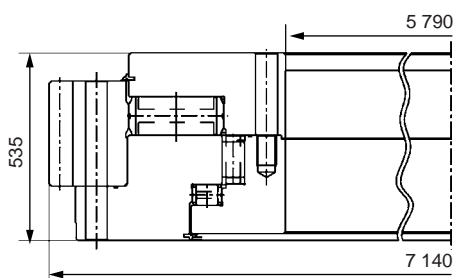


図21 軸受断面(SP / DTR5790TAG)
Section of bearing



図22 軸受外観
Appearance of bearings

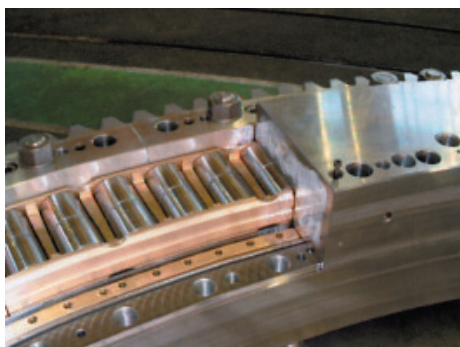


図23 軸受内部
Inside view of bearings

10.2 溶融炉用旋回座軸受

形式：四分割型単列ボール軸受

呼び番号：SP / TH7690

使用箇所：廃棄物中間処理施設の溶融炉用旋回台

1基当たり，100ton / 日の処理能力を持つ回転表面溶融炉を用いた溶融処理システムに世界最大級である分割型旋回座軸受が採用されている。同システムは，焼却灰や埋め立て廃棄物などを高温で溶かして固体化することで廃棄物の最大限の減容・減量化，さらにはリサイクル品とする。またダイオキシンを99%以上分解することができる。

図24～26に軸受断面，軸受外観，溶融炉構造図を示す。

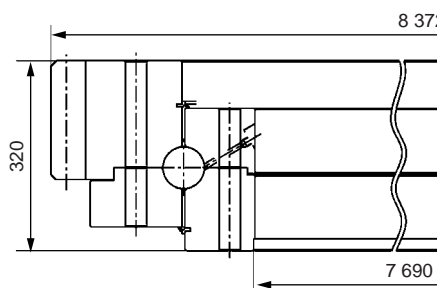


図24 軸受断面(SP / TH7690)
Section of bearing

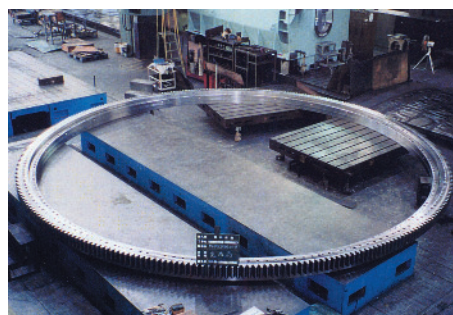


図25 軸受外観
Appearance of bearings

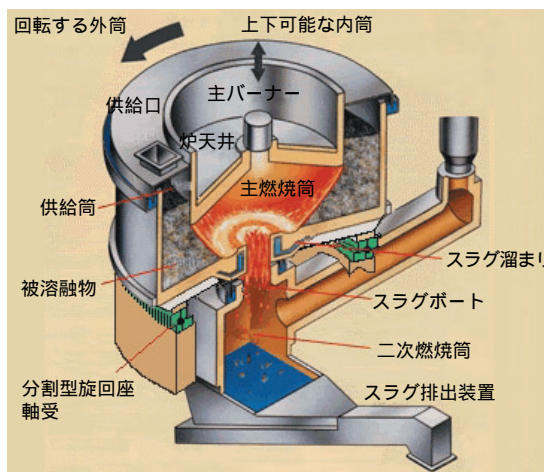


図26 溶融炉構造
Structure of melting furnace

11. おわりに

今後トンネルの長大化に伴い、トンネル工事には安全性向上および工事期間の短縮が求められる。このため、大型トンネル掘進機にはより一層の効率向上および省力化が求められる。

Koyoの開発した分割型旋回座軸受はこの期待に応えられる製品である。

一方、小型トンネル掘進機においても、工事後にトンネルから容易に回収できる分割型旋回座軸受が使用され始め、トンネル掘進機の再利用に貢献している。

また、トンネル掘進機以外の超大型軸受にも分割型旋回座軸受が採用された。

より一層市場のニーズおよび要求、性能に応えられる分割型旋回座軸受の開発に継続して取り組んでいきたい。

参考文献

- 1) 西 喜則, 安達 文博: Koyo Engineering Journal, 133(1988)16.
- 2) 建設機械, 242, 21, 5(1985)19.
- 3) 建設機械, 243, 21, 6(1985)56.
- 4) 建設機械, 245, 21, 8(1985)125.
- 5) 産業機械新報, 1671(1986)2.

筆 者



蔵下義一*
Y. KURASHITA

* 軸受事業本部 産業機器技術部