

水中モートル用放流形スラスト軸受の特性

Characteristic of Discharge Type Thrust Bearing for Submersible Moter

大和田 武 義*
Takeyoshi Owada

長谷川 健 吾*
Kengo Hasegawa

岡 野 金 平**
Kinpei Okano

要 旨

水中モートルの軸受には、その方式に合った各種の軸受が用いられている。このうちで、水封式モートルに使用されている水潤滑軸受の特性についてはこれまで検討例は少ない。そこで本報ではモートル内の軸受のうちで、最も運転条件のきびしいスラスト軸受を対象として、水潤滑の場合の特異性について検討を加え、構造が簡単で、高性能を有する放流形水潤滑スラスト軸受を開発した。この結果一般の水中モートル用スラスト軸受に比べて、大幅に許容負荷容量を上げることができ、かつ、安定した軸受特性を保持することができるようになった。

1. 緒 言

ポンプの発達とともに、水中モートルの採用機種はますます広がりがつつある。水中モートルは、その用途方式によって各種あるが、最も多く使用されているものは、モートル内にも清水を入れた方式であり、この水によって電気部の冷却や軸受の潤滑を行なっている。このため、コイルの絶縁法、軸受潤滑方式が一般地上用モートルと大きく異なる点である。コイルの絶縁法および耐水絶縁特性については各種紹介されている^{(1)~(8)}。

軸受関係についての、油潤滑方式の特性については数多く研究さ

れているが、これに対し、水潤滑軸受の場合についての研究はきわめて少なく、しかもミッチェル形の潤滑剤を水にした場合などで⁽⁴⁾、水中モートルの信頼性を向上するためには、安定した軸受の開発が必要である。このため、水潤滑方式の特異点および、特性について検討を加えた結果、負荷容量の高い放流形軸受を開発することができたので、以下これについて紹介する。

2. 水中モートルの種類および軸受の必要条件

2.1 水中モートルの種類と軸受の適用

水中モートルの種類を方式・構造・用途などにより大別すると次のように分けられる⁽⁹⁾。

(1) 水封式水中モートル

モートル内に清水を充満した方式であり、地下水取水を主とした深井戸用とか、上下水道設備用・建築設備用・農事用など最も広く使用されている。

モートルがポンプの下に取り付けられるものとしては、図1の深井戸用の構造例に示すように、一般にモートルの下部にスラスト軸受を設け、これによって、ポンプの運転時に発生する大きなスラスト荷重を受ける方式をとっている。

モートルがポンプの上に取り付けられるものとしては、図2の

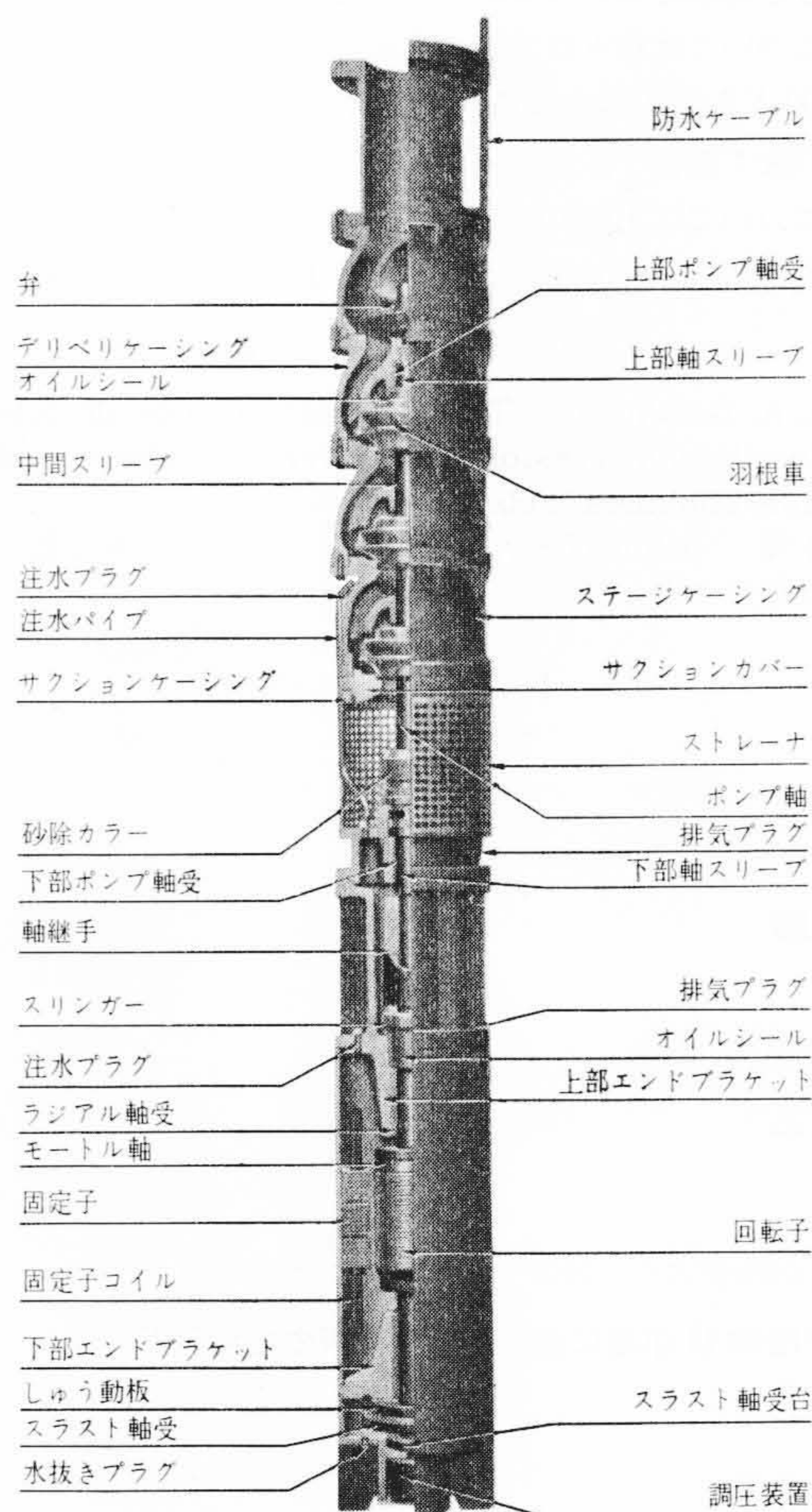
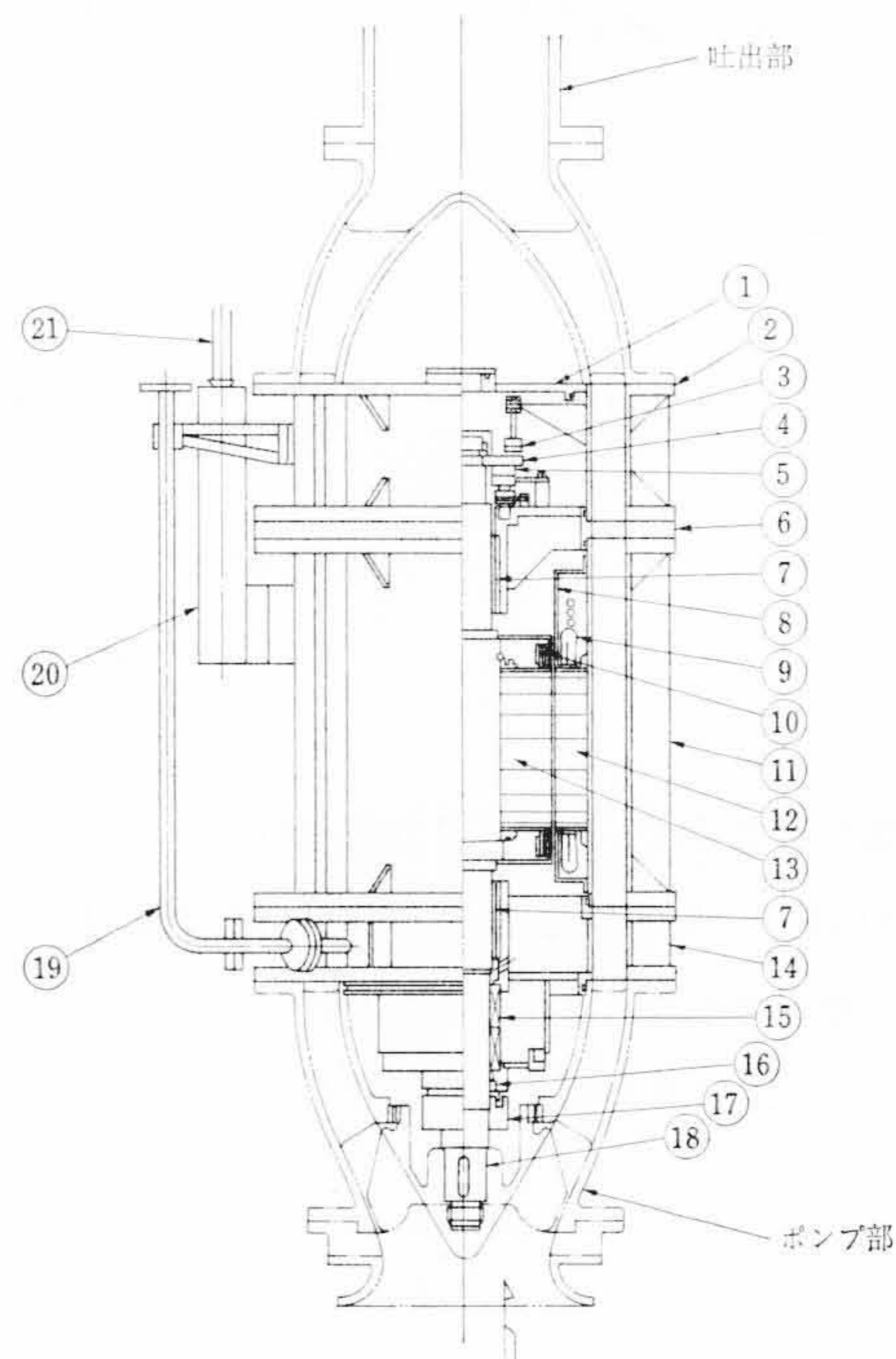


図1 深井戸用水中モートルポンプ構造例



- ① カバ
- ② エンドカバ
- ③ 上ベアリング
- ④ しゅう動板
- ⑤ スラストメタル
- ⑥ エンドブラケット(上)
- ⑦ ラジアルメタル
- ⑧ コイルささえ
- ⑨ コイル
- ⑩ ロータカバ
- ⑪ ハウジング
- ⑫ ステータ
- ⑬ ロータ
- ⑭ エンドブラケット(下)
- ⑮ メカニカルシール
- ⑯ オイルシール
- ⑰ スリンガー
- ⑱ シヤフト
- ⑲ 補給パイプ
- ⑳ 接続箱
- ㉑ ケーブル

図2 上置形水中モートル構造例

* 日立製作所習志野工場

** 日立製作所日立研究所

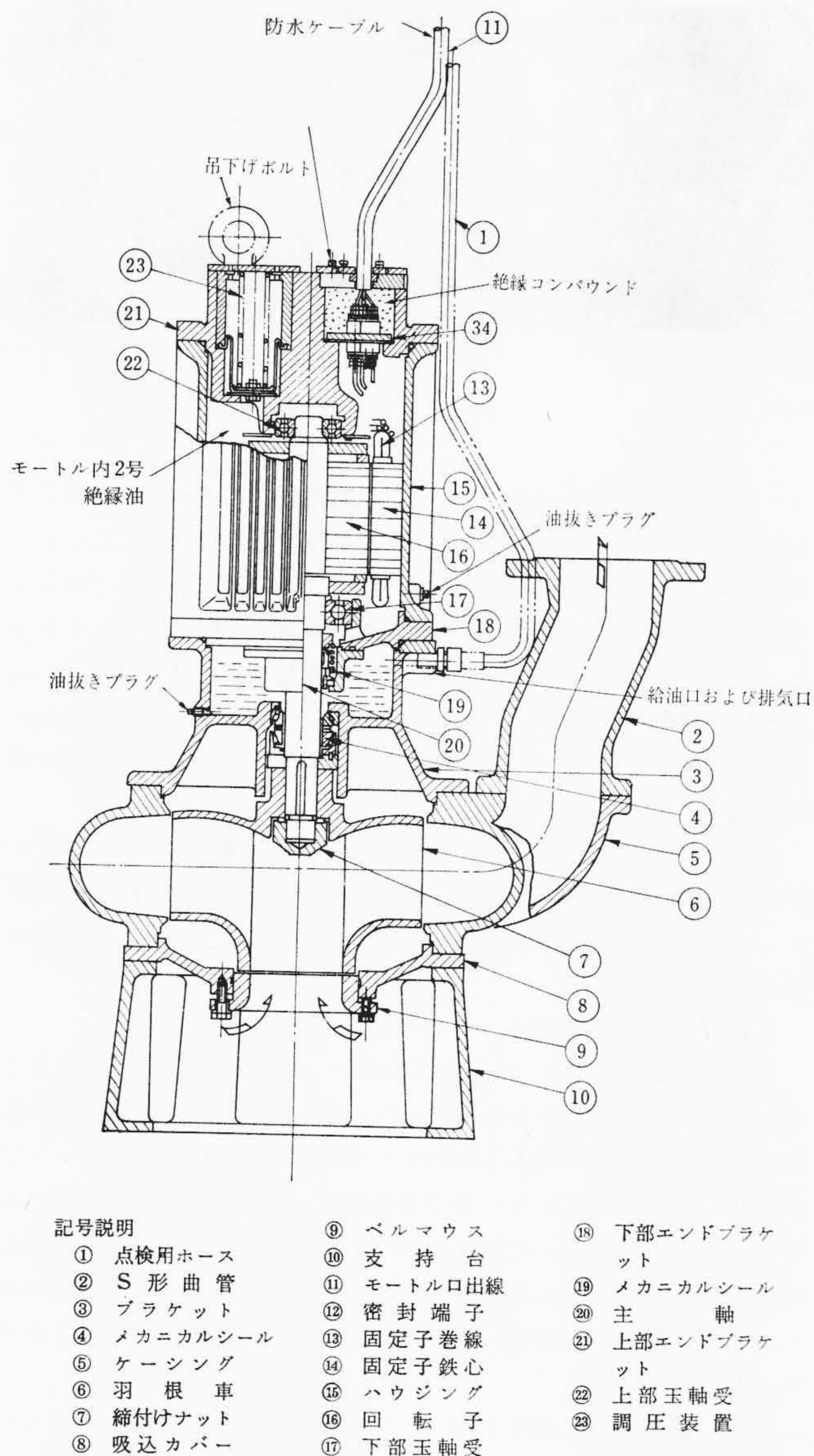


図3 上置式油封式水中モートル構造例

例に示すように、最上部にスラスト軸受を設けている。

いずれの場合にも中間には回転子をささえるラジアル軸受がある。これらの軸受は、モートル内の清水によって潤滑冷却する方式をとっている。

(2) 油封式水中モートル

モートル内に絶縁油などの油を封入して、モートル内への取排水の浸入を防止した方式で、汚物排水排水用とか、土木農事関係のポンプに使用されている。図3は汚物排水ポンプと組み合わせた油封式モートルの構造例を示したものである。この種のモートルにおいては、封入油によって軸受が潤滑されるので、ころがり軸受が用いられる。しかし、封入油はコイルの絶縁用も兼用しているため、一般に絶縁油を用いているので、この潤滑性能を考慮した軸受仕様を選定している。

(3) 乾式水中モートル

モートル内部には空気またはガスを封入しているため、コイル、軸受ともに地上用モートルと同様の方式をとっている。この種の水中モートルは、土木機械用、汚物排出用など、比較的1日当たりの運転時間の短いものまたは保守点検の容易な環境条件のものに適用される。

以上のような各種水中モートルに使用されている軸受の作用を大

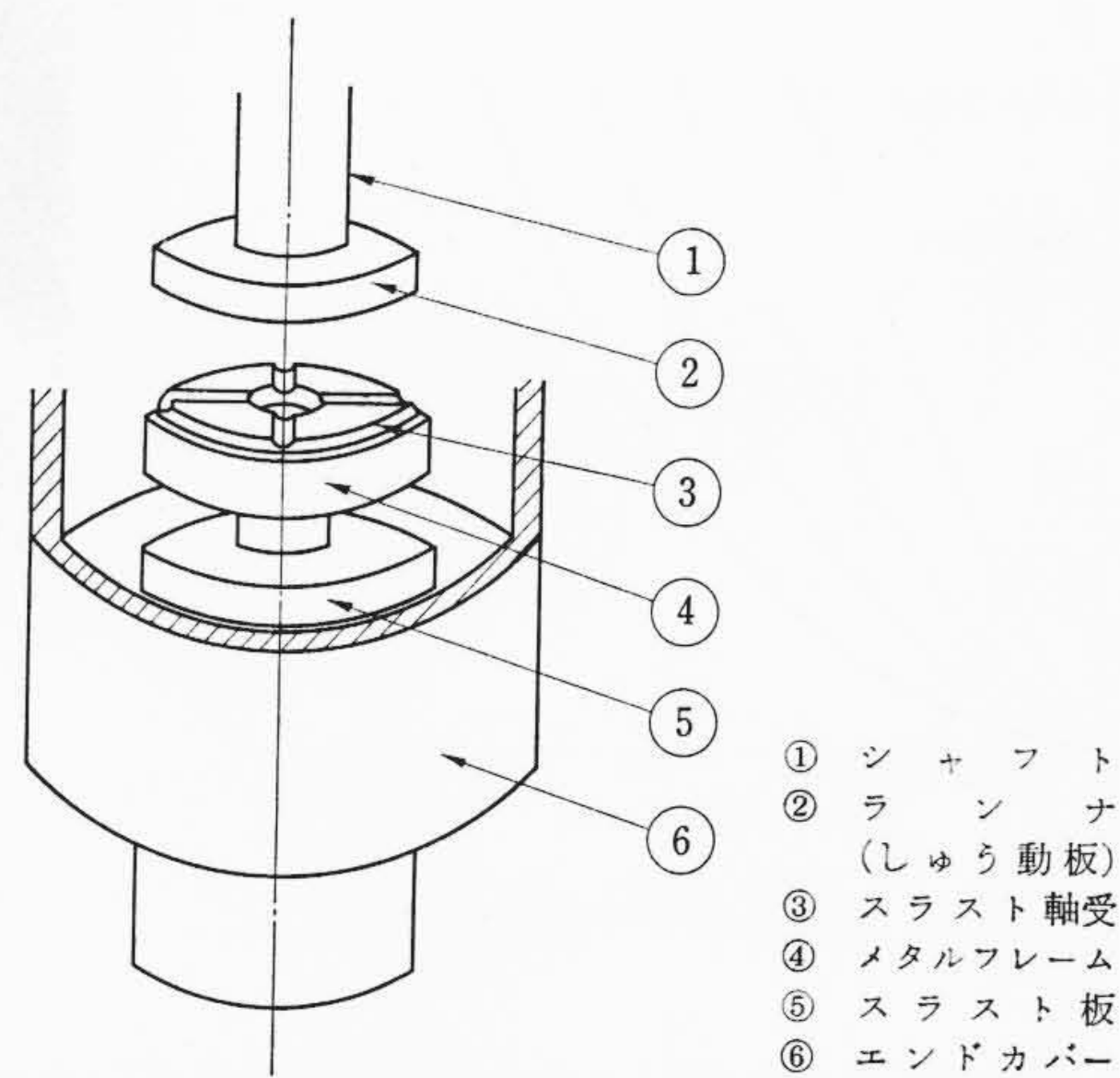


図4 円板形スラスト軸受構造例

別すると、回転子をささえるラジアル軸受および、ポンプの運転時に発生するスラスト荷重を受けるスラスト軸受がある。水中モートルはほとんどの場合ポンプと直結運転のため平常時のラジアル荷重は小さいが、スラスト荷重は大きく、運転条件、稼働経過時間によってもその数値は変わるので、スラスト軸受の方式、負荷容量の選定、軸受の寿命などは、モートルの信頼性向上のために重要な点であるとともに、ポンプの設計製作上重要な点である。しかし、油潤滑軸受については、一般に広く使用されているので、以下水潤滑軸受についてのみ解説してゆく。

2.2 水潤滑軸受の必要条件

油潤滑軸受においては、軸の回転によって発生する流体油膜圧力によって荷重がささえられるが、水潤滑軸受の場合は、潤滑剤となる水の粘度が一般の滑潤と比較して1/20以下と低いものであるため水の潤滑膜による荷重保持は期待できず、境界潤滑状態であることが推測される。大荷重を受けるスラスト軸受は特に条件がきびしいので、これについて軸受材・構造などの必要条件を列記すると、次の主要項目が数えられる。

(1) 軸受材

耐食性、耐摩耗性が高く、摩擦係数の低い材料の組合せとなるように選定すること。

(2) 構造

- (i) 軸受面の潤滑冷却に有効な構造であること。
- (ii) 汎用品に適用できる生産性に富んだ構造であること。
- (iii) 保守上分解組立の容易な構造であること。
- (iv) 小形・安価であること。

スラスト軸受として代表的なものは、ミッチェル式またはキングスベリー式のように軸受メタルを分割した方式で、これが広く使用されている。しかし、この方式は性能は良いが構造が複雑であるため、水中モートルの場合も特殊な用途、機種に採用されている。また、汎用標準の水中モートルにおいては、図4に例示するような、非常に構造が簡単な円板組合せ方式の軸受を用いている。この方式の場合は、軸受材の自己潤滑性にたよるところが大きいので、高い面圧とすることができず、小形大容量スラスト軸受の製作が困難である。よって、これらの点の改良がおもなる問題点とされている。

3. 水中スラスト軸受の問題点の検討

従来、水中軸受材料としては熱可塑性樹脂、焼結カーボンおよび硬質ゴムなどの非金属系あるいは銅鉛合金などの金属系の各種材料が開発され、これまで各分野にそれぞれ使用されているが、基材のもつ潤滑性、耐食性および耐摩耗性などを総合すると焼結カーボン

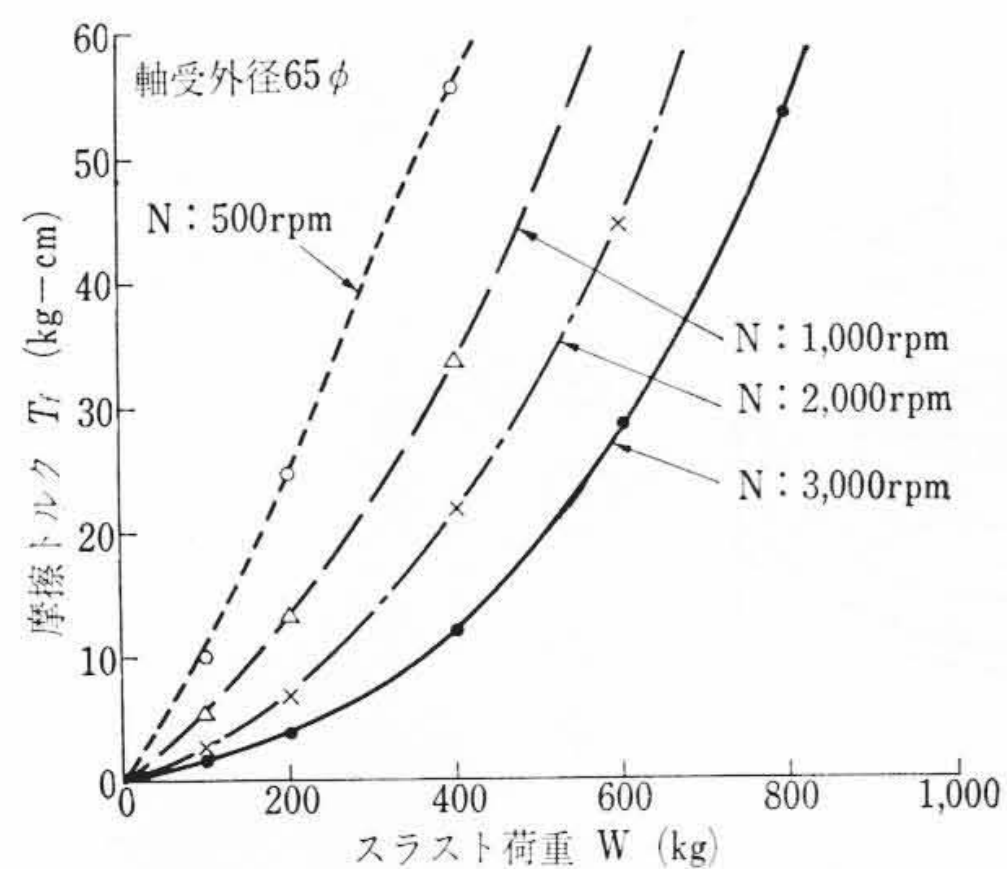


図5 円板形軸受の摩擦特性

に多くの特長が見られる。このため、現状では水中モートル用の軸受材料としては金属含浸処理を施した焼結カーボンが多く使用される。一方、水中モートル用軸受は一般の立形電動機における形式を流用したもので、図4に示すように構造的にはこれまでと大差はない。このため、軸受は潤滑みぞをもつ円板としこれに対する回転側のランナしゅう動面は軸受設計上の常識として平坦(へいたん)な円板形状が普通とされる。

さらに、水中軸受では潤滑剤として低粘度の水を使用するため一般の油潤滑の場合とは異なり、実用荷重領域ではスラスト荷重をすべて流体潤滑膜により保持することは困難とされる。したがって軸受機構的には混合潤滑の領域に属するので、しゅう動面の物性および接触形態などの各種要因が軸受特性に影響を与えるのでその機構は複雑である。

ところで、水中モートル用のスラスト軸受については運転性能とともに寿命が重視されるため実用上の使用限界は現実には軸受異常摩耗の発生有無により判別される。しかし、この摩耗特性に対しては数多くの因子が関連し現象の定量的判定および解析が困難とされるため本報では摩耗と密接に関連する摩擦特性に着目し基本性能を比較検討した。

まず、軸受面に潤滑みぞをもつ従来の円板形軸受について摩擦特性を検討した。図5は水中モートルの実働運転温度を参考に潤滑水温度を50℃とした場合における摩擦トルクを示した一例で、図のように T_f はスラスト荷重に対しほぼ比例して上昇する特性を示し、増加の割合はランナ回転数が低いほど大きく現われる。このため、在来の円板形軸受ではすべり面の分離に必要な潤滑膜の形成はじゅうぶんでなく T_f に対してはしゅう動面の境界摩擦特性が大きく影響することが確認された。

以上のように、水中軸受の潤滑は混合領域にあるが摩擦機構を推測する意味で境界膜による荷重分担率 W_b を検討した。ここで W_b は軸受摩擦係数 μ に対し次式で与えられる。

$$W_b = \frac{\mu - \mu_f}{\mu_b - \mu_f}$$

ここで、 μ_b は軸受材の境界摩擦係数、 μ_f は水膜摩擦係数である。いま供試の軸受材(焼結カーボン)ーランナ(ステンレス鋼)の組合せに対しては $\mu_b=0.03$ μ_f は定格回転の場合0.0005となるので、円板形軸受における W_b は約15%を示すことが判明した。このため、軸受の発熱に関連する摩擦仕事としては境界摩擦成分が大部分を占めることが明らかにされた。

4. 放流形スラスト軸受の特長と二、三の性能

前述の諸検討により従来の円板形水中軸受の問題点が明らかにされたが、筆者らは特性改善の具体策として在来の軸受設計概念とは逆に静止側の軸受面の形状を単純の円板とし、これに対し、回転側

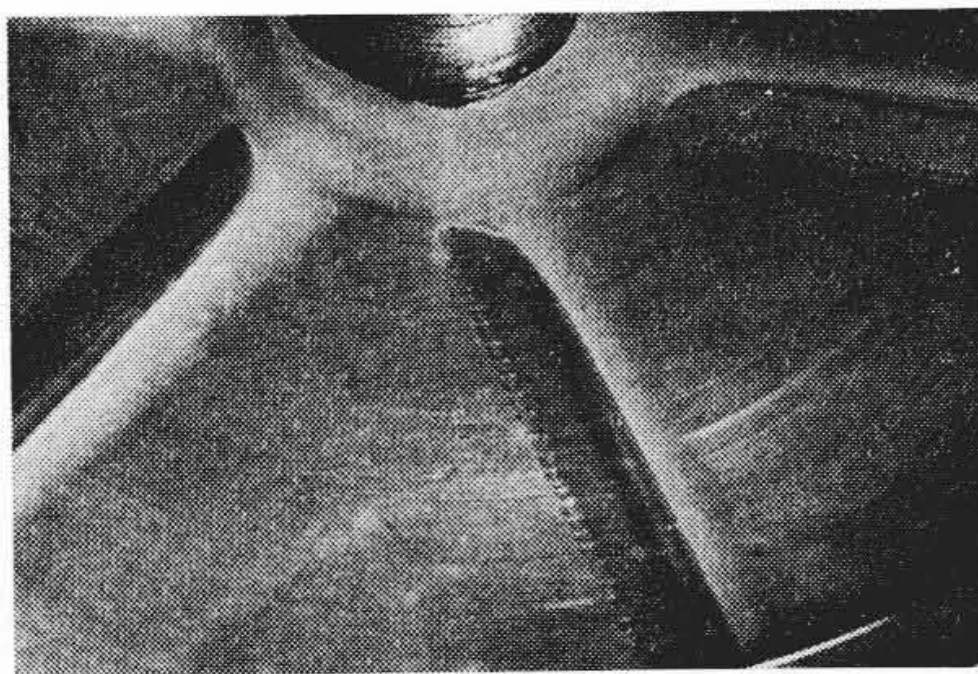


図6 潤滑水流動特性

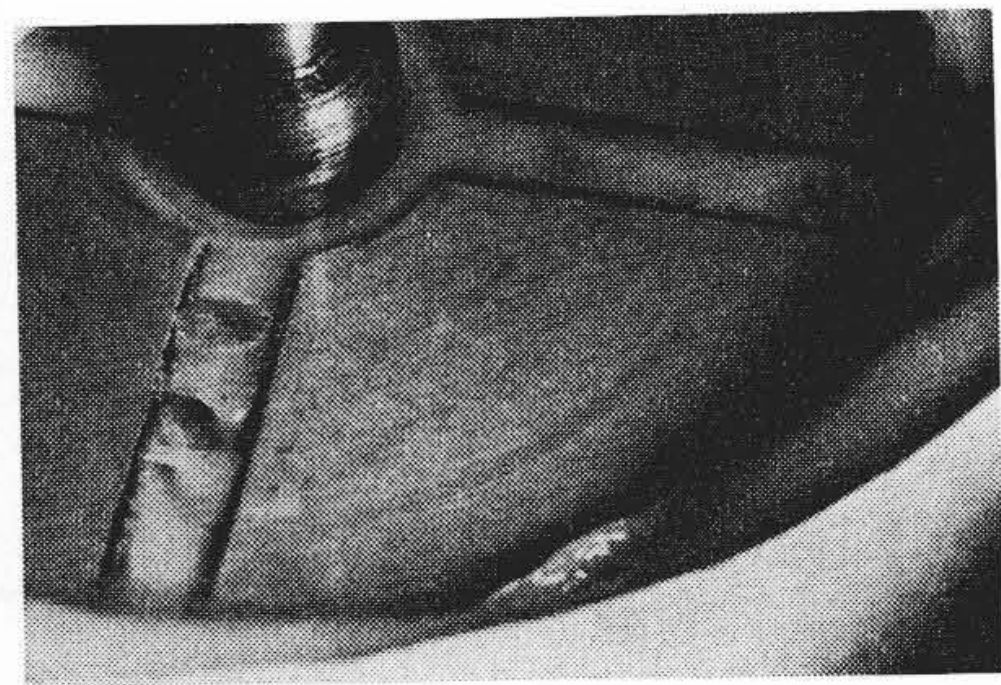


図7 潤滑水流動特性

のランナしゅう動面に軸受諸元および回転条件に適合した放射みぞを設定し、これらの組合せにより流過水量の増加を企図したいわゆる放流形スラスト軸受方式を考案した⁽⁶⁾。この方式によると相対すべり速度を利用した理論上の潤滑効果は在来と同じと考えられるが、これに加えてランナ放射みぞにより誘起されたポンプ作用により大量の潤滑剤が軸受面を流過するので、目的とするしゅう動面の強制冷却効果のほかに、異常摩耗防止に有効とされる異物除去の効果が期待される。

以上のように、放流形軸受ではランナ表面に設定する放射みぞの形状寸法が性能に関連した要素であるが、以下、この軸受の性能概要ならびに従来の円板形軸受との比較について二、三の検討結果を述べる。

4.1 潤滑水流動特性

一般に軸受機構上はしゅう動面における潤滑剤の挙動が要点となるが、放流形方式の特長を解明するため回転中における潤滑水の流動特性を検討した。図6は軸受面が平坦の円板に対し回転ランナに山形断面の放射みぞをもつ放流形軸受について実測した一例であり、図のように放射みぞの端部を円周より外周側に向かって潤滑水が流過し、さらにこれが軸受面全体に拡散する状況が明確に認められ、しゅう動面への潤滑水の導入、拡散が有効に作用することが判明した。

一方、図7は供試条件を同一とした従来の円板形軸受についての実測例を示したもので、図のように軸受潤滑みぞの中央付近に多数の気泡が観測され、この気泡はみぞの内部に停留する。このため、潤滑特性上必要とされる半径方向の流れはじゅうぶんでなく、したがって円板形軸受では潤滑水の流動特性に関しては改良の余地のあることが実証された。

4.2 軸受摩擦特性

前記のように円板形軸受の摩擦トルクは荷重に対しほぼ比例的に増大する特性を示すが、放流形軸受の特性および従来との比較を明らかにするため、前述の供試円板形と同一の軸受諸元(外径65φ)をもつ放流形軸受(放射みぞ幅4mm 山形6本)について摩擦特性を検討した。

図8は潤滑水温度を50℃とした場合における T_f 実測値であり、

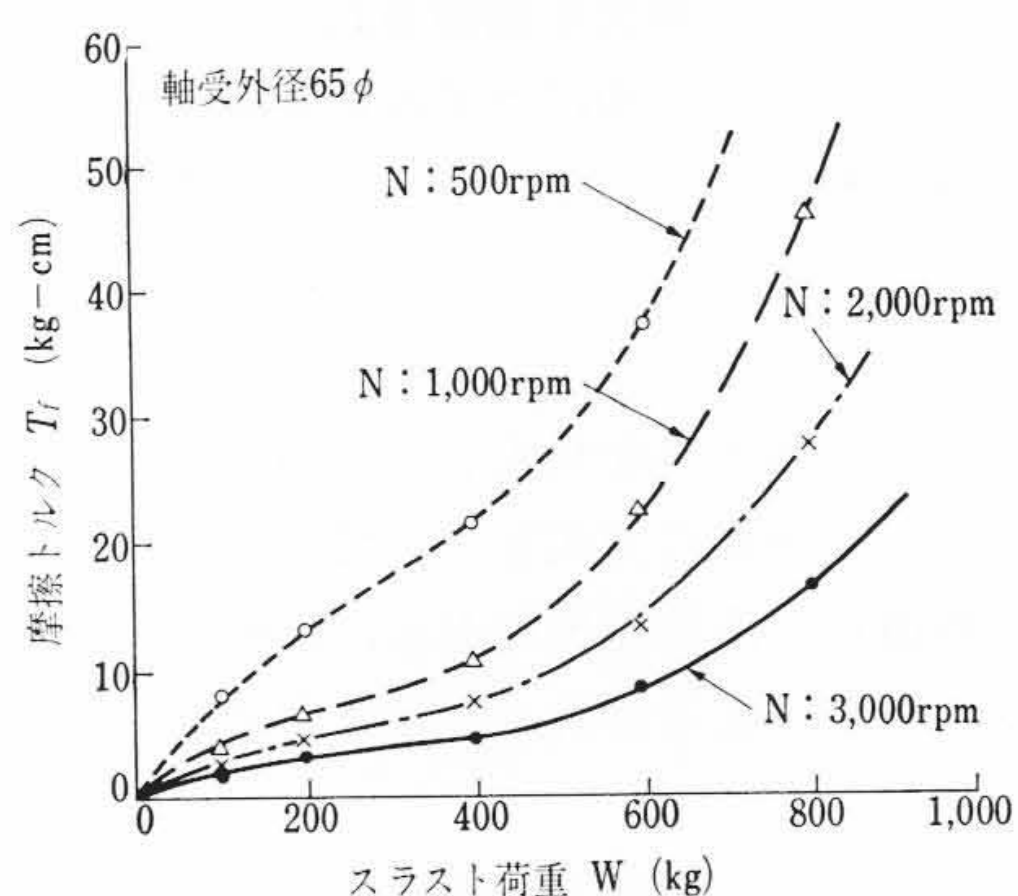


図8 放流形軸受の摩擦特性

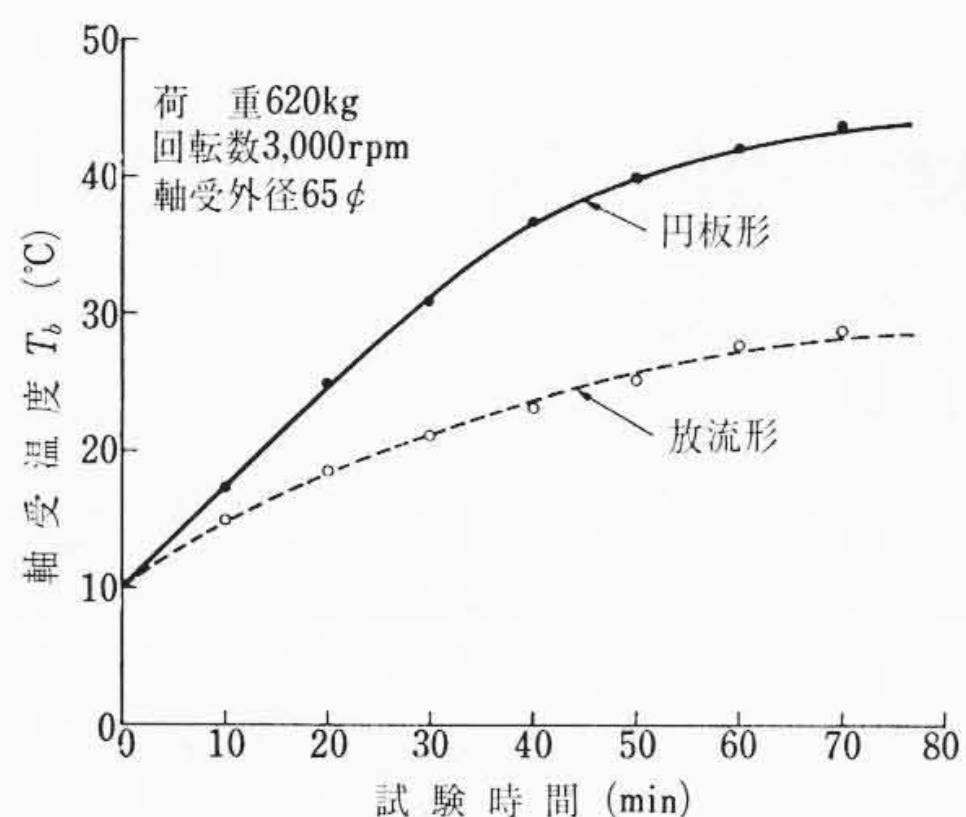


図9 軸受温度特性の比較

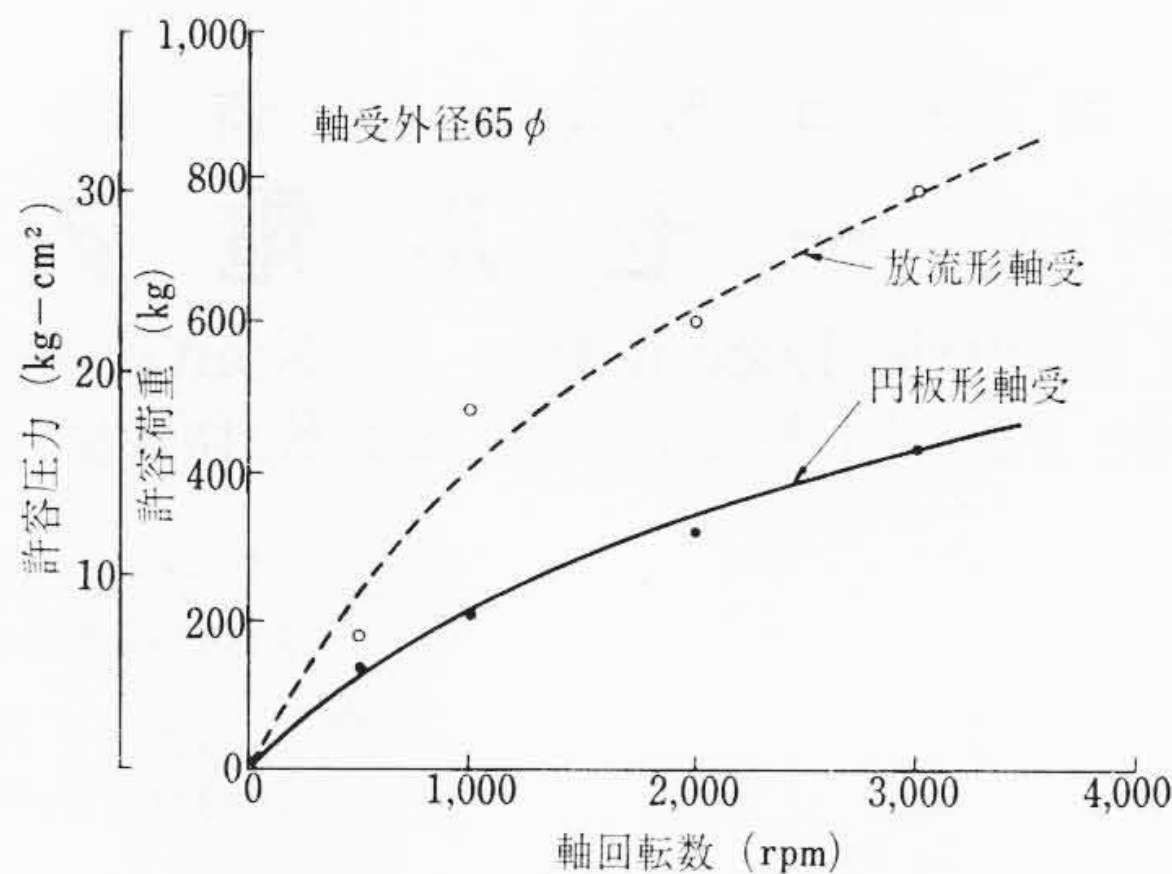


図10 軸受許容荷重特性

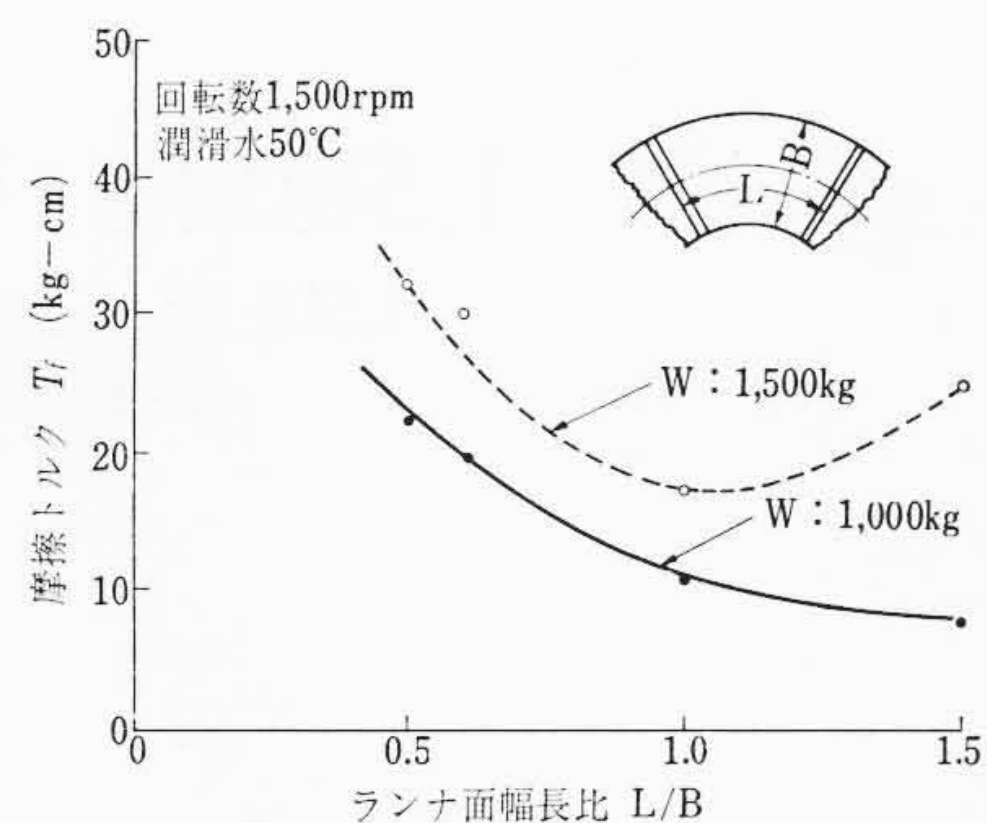


図11 幅長比の影響

図のように低荷重域においては T_f は全般に小さいが高荷重域では T_f の増加割合は増大する。しかしさきの図5に示す円板形の場合に比較すると T_f は全般に小さいことが判明した。

なお、供試軸受材として使用した焼結カーボンでは過度の温度上昇は軸受面の焼付けおよび異常摩耗発生の原因となる。そこで形式の相違による作動特性の安定度を比較のため、運転温度特性を検討した。

両者の軸受温度（表面より1mm深さ位置）の実測結果を比較した一例は図9に示すとおりである。図のように温度平衡状態では放流形は円板形に比較し T_b は約35%の低下が認められた。

4.3 許容荷重特性

一般に定常の潤滑膜が形成された場合の軸受許容荷重は膜厚特性により規定されるが、水中軸受のような混合潤滑の場合については統一的基準はなくこのため水中軸受では速度係数をもとにした設計指針が一部で使用されている。一方、前述の摩擦および温度特性によると供試の範囲では T_f と T_b はほぼ比例的関係を示し、 T_f の大きい高温領域では軸受面に顕著なざらつき摩耗が発生するが、 T_f の小さい比較的低温域では摩擦面の荒損は少なく、安定した特性を示すことが確認された。以上のように、 T_f は速度上昇に伴い減少する関係を示すので水中軸受に関しては在来の許容荷重に対しての定義ではじゅうぶんでないことがわかる。そこでここでは実機作動温度を参考に軸受温度を50°Cに仮定し、この温度に対応する $T_f = 15 \text{ kg-cm}$ を供試軸受に対する性能比較の意味で許容作動限界とした。このようにして、さきの図5および図8の結果より各回転数の場合における許容荷重を比較した。

図10は許容荷重に対する形式相違の影響を表示したもので、図のように許容荷重は一般の速度係数による場合と異なり回転数の上昇に伴い増加する傾向を示し、 T_f の小さい放流形は円板形に比較し W_a は約2倍に増加することが確認された。

4.4 ランナしゅう動面の形状効果

放流形軸受は摩擦しゅう動面の強制冷却に着目した方式であるがこのため軸受面を流過する潤滑水の水量が特性上の要素とされる。この水量は放射みぞの形状諸元および数により決まるが、一方では

ランナの表面形状とくに単位面の幅長比に関連する。そこで筆者らはランナしゅう動面の形状効果について種々検討を加えたが、結果の一例は次に示すとおりである。図11は摩擦特性に対するランナ単位面幅長比 L/B の影響を比較した結果であり、図のようにランナ面の幅長比 $L/B = 1.0$ において T_f は最小を示すことがわかる。この $L/B = 1.0$ は一般の分割形軸受の最適幅長比に近く T_f の減少は水膜による負荷分担比の増加が原因と考えられる。

5. 結 言

水中モートル用水潤滑スラスト軸受の動作特性解析と、新方式の高性能軸受として開発した放流形スラスト軸受の検討概要を紹介したが、これらを要約すると次のとおりである。

- (1) 軸受材としては、自己潤滑性を有するカーボン系が適している。
- (2) 軸受のしゅう動面には、潤滑剤である水を有効に供給するために、ランナ側に潤滑みぞを設けることにより、特性を大幅に向上することができる。
- (3) 潤滑みぞは、しゅう動面の幅と長さの比を1に近い数に選ぶことが有効である。
- (4) 放流形軸受の開発により、水潤滑スラスト軸受の負荷容量は大幅に向上することができた。

これらの検討を第一歩として、今後とも軸受性能の改善と、水中モートルの信頼性の向上を図る所存である。

終わりに本研究に対し、種々ご指導ご援助をいただいた日立製作所日立研究所および習志野工場の関係者に深甚な謝意を表する。

参 考 文 献

- (1) 宮下、井上：電学誌 Vol. 87-10 No. 949 (昭42)
- (2) 大和田、鎌田：日立評論 Vol. 47 No. 35 (昭40) ほか
- (3) 大和田：Hitachi Review Vol. 16 No. 11 (1964)
- (4) 佐々木、三島ほか：日本機械学会論文集 Vol. 29 No. 205 (昭38)
- (5) JIS-B-8324, JIS-B-8325
- (6) 特許出願中

お 知 ら せ

昭和45年1月1日から、住居表示の変更により、「日立評論社」の住所は次のとおりとなります。

記

新住所 東京都千代田区丸の内1丁目5番1号
旧住所 東京都千代田区丸の内1丁目4番地