

8. CAE の活用

7章まで、軸受の種々特性計算について、主に代数的に計算可能な範囲で、式の導出、展開も含め解説した。これらの計算式は、コンピュータによる計算が一般的でない時代から利用されており、設計者がいわば“紙と鉛筆”で計算できるように工夫が凝らされている。

近年ではコンピュータが一般に普及し、またその性能が飛躍的に発展したことから、原理的な関係式を構築した後の解の導出については、コンピュータによる繰返し計算（数値解析）に任せられるようになった。これにより、7章までに解説した計算よりもさらに複雑な条件を考慮した計算が行えるようになってきている。

本章では、これらの数値解析事例について紹介する。

8.1 周囲変形を考慮した転動体荷重分布計算

8.1.1 軸たわみおよび軸受剛性を考慮した軸受内荷重分布計算

4章の計算では、軸受を完全な固定支点と仮定して軸受荷重を解いた。しかし実際には、内輪側に荷重をうけた軸受は、3章で示すように外輪に対して内輪がわずかに変位し、非線形のばねのような挙動を示す。このため、完全な固定点と仮定した場合の計算荷重と実態荷重とが一致しないケースが存在する。

このような場合、軸たわみと軸受剛性（軸受の内部諸元および荷重によって複雑に変化する）を双方考慮した数値計算を行う必要がある。

図 8.1 に、計算モデルの概略図を示す。ここで、軸受は並進 3 方向、回転 3 方向の 6 自由度の変位 u_1 、剛性 K_1 をもつばね（非線形ばねであり K_1 は u_1 に応じて変化する）として、軸は同様にばね要素として（ここでは K_2 、 K_3 の剛性を持つばねとして示す）モデル化する。これらの各点におけるばねからの力およびモーメントがそれぞれ外力と釣り合うよう、全体の変位量が解かれる。

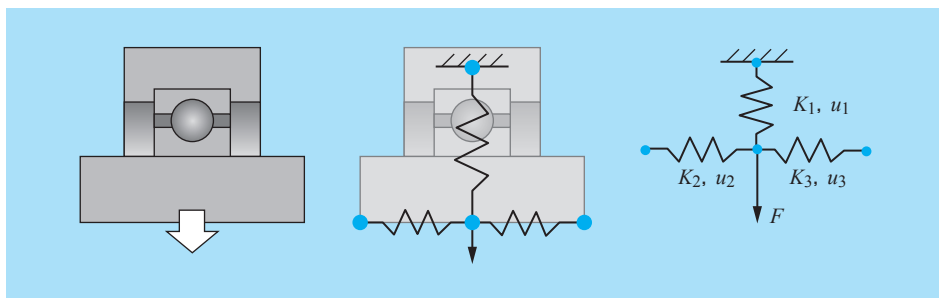


図 8.1 軸および支持軸受のばねモデル概略図

上記計算を応用し、トランスミッションにおける軸受転動体荷重分布を計算した例を図 8.2 に、その際の中央軸の変位量を図 8.3 に示す。軸がギヤ荷重によりアキシャル方向に移動するとともに、軸曲げが生じ、転動体荷重に影響を与えていることが解析されている。

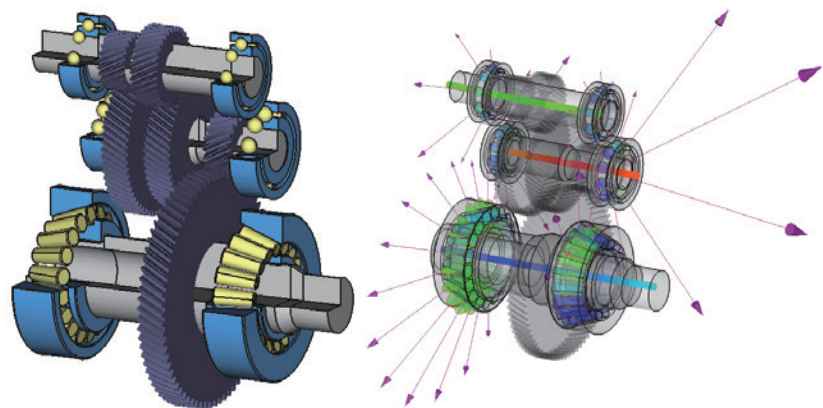


図 8.2 トランスミッションの解析例

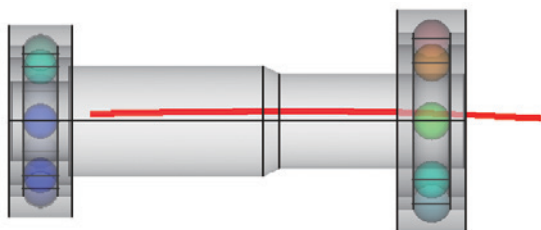


図 8.3 中央軸変位量 (200 倍)

8.1.2 外輪、ハウジングの変形を考慮した計算

ここまでの計算は、基本的に外輪は転動体との接触部における弾性変形のみである、という前提で構築されている。言い換えると、外輪全体がだ円形状に変形したり、「く」の字形に曲がったり、ということは想定していない。

多くのアプリケーションでは、軸受が取り付けられるハウジングは十分な剛性を有しているため、外輪全体の变形は非常に小さい。しかし一部のアプリケーションでは、種々の理由によりハウジングの剛性が低い（肉厚が薄い、アルミ合金が用いられている、など）場合や、そもそもハウジングが存在せず、軸受をタイヤやガイドロールのように用いる場合がある。このような場合は、外輪（+ハウジング）の变形を考慮した、内部荷重分布、接触応力の計算を行わなければならない。

外輪荷重が一点集中である等、単純モデルに置き換えられる条件の場合、外輪を曲がりはりとして近似し、上述のばねモデルに当てはめることで計算を行うことが可能である。しかしこれより複雑な形状、たとえばハウジングの詳細形状を考慮する必要がある場合などは、計算式の構築は困難である。このような場合は、FEM（有限要素法）を活用する。

なお、理屈の上では内輪の变形も考慮した方が計算精度は向上するが、一般に内輪は外輪に対して剛性が高い（小径のため）上、軸にしまりばめで取付けられることが多いことから、内輪变形を考慮する必要のあるアプリケーションは外輪に比べて非常に少ない。

FEM では、軌道輪と転動体の接触部のようなマイクロ部の計算を純理論計算ほど高精度には行えないため、軌道輪と転動体の接触部の取り扱いには工夫が必要となる。局所的に細かい要素分割を行って軌道面と転動体の接触問題を忠実に解くものから、転動体を非線形ばねとして再現する手法まで、種々の手法が考案されており、この取り扱いが計算速度および精度に直結する。

また、通常高精度な FEM は計算時間を要することから、多数の条件を高速に計算したい場合、転動体と外輪の接触部近傍に自由度を残した“仮想ばね”（縮約剛性マトリクス）を作成し、上述のばねモデル計算と連成させることで、外輪变形を考慮した転動体荷重分布を高速に求めることも行われている。

図 8.4 に、ハウジング变形を考慮して転動体荷重分布を計算した例を示す。ハウジングを、赤色で示す面で固定し、ラジアル荷重を負荷した場合の外輪変形量を右上に、転動体荷重分布を右下に示す。ラジアル荷重によって外輪およびハウジングがだ円状に変形することで、ラジアル荷重方向に位置する転動体の荷重が抜け、逆ハート状の分布を示すようになる。

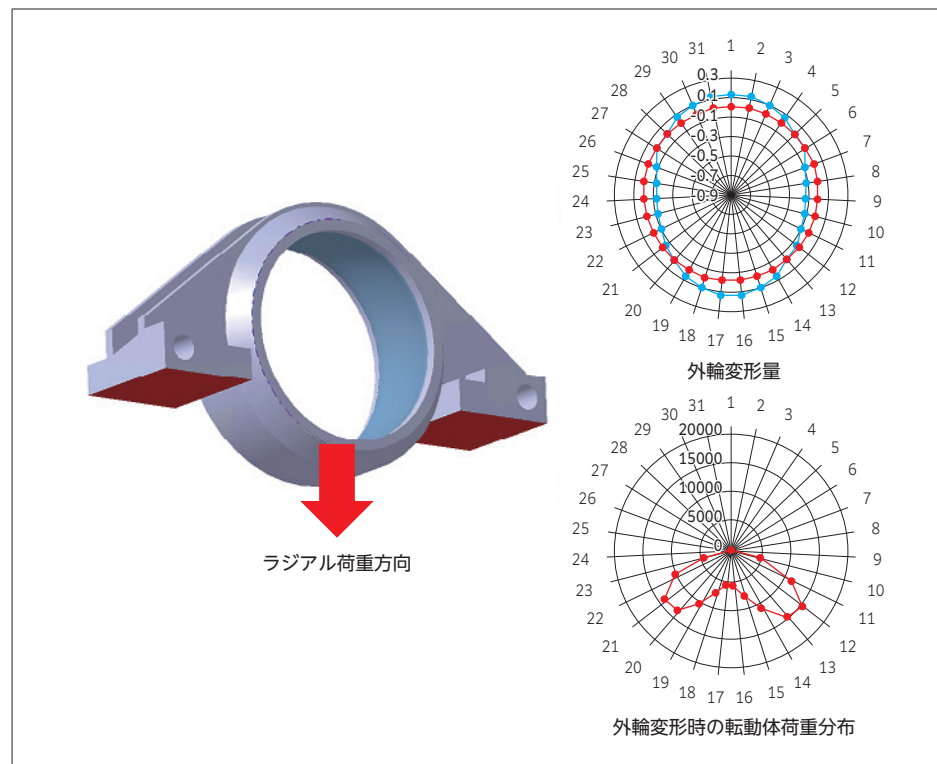


図 8.4 ハウジング変形による転動体荷重分布の変化

8.2 軸受温度計算

運転中の軸受は発熱し、周囲に別の熱源がない限りは、軸受温度は周囲に比べ高温となる。

一般に、運転中の軸受部品で最も高温になるのは転動体であり、次が内輪、その次が外輪となる。ただし転動体と内輪の温度差は小さい場合が多い。

周囲に軸受以外の熱源がないと仮定すると、軸受の温度は、軸受の発熱量と周囲への放熱量が等しくなる状態で安定する。

8.2.1 発熱の考慮

軸受の発熱量 H は、一般的には 6 章に解説する軸受トルク T および回転速度 n から、以下の式にて求められる。

$$H = 2\pi n T$$

軸受のトルクは、荷重、回転速度の他、軸受内部設計、潤滑剤の粘度によっても変化する。このうち、潤滑剤粘度は運転温度に大きく依存し、そのために軸受トルクも温度によって大きく変化する。結果として、軸受の発熱量と軸受温度は片方を一意には求められず、連成させて解く必要がある。

8.2.2 放熱の考慮

軸受から周囲への放熱量 Q は、ハウジングや軸接触部での熱伝導による放熱量 Q_L 、潤滑剤流れによる外部への熱伝達による放熱量 Q_o 、輻射による放熱量 Q_r の和で求められる。

$$Q = Q_L + Q_o + Q_r$$

このうち、 Q_r は通常無視できる。

Q_L 、 Q_o は、潤滑剤の量や潤滑方法、軸やハウジング周辺の構造や冷却機構などによって変化し、軸受温度に大きな影響を与える。特に予測が難しいのが、熱伝達による放熱量である。

熱伝達率は、単純な形状・流れであれば各種便覧などから得ることができるほか、近年では CFD（流体解析）による計算も活用される。

図 8.5 は、工作機用軸受間座に空冷機構をつけた際の解析例である。空冷ノズルを周方向に沿うように設置することで、空冷エアの流速が増大し、放熱条件が良好となることを示している。

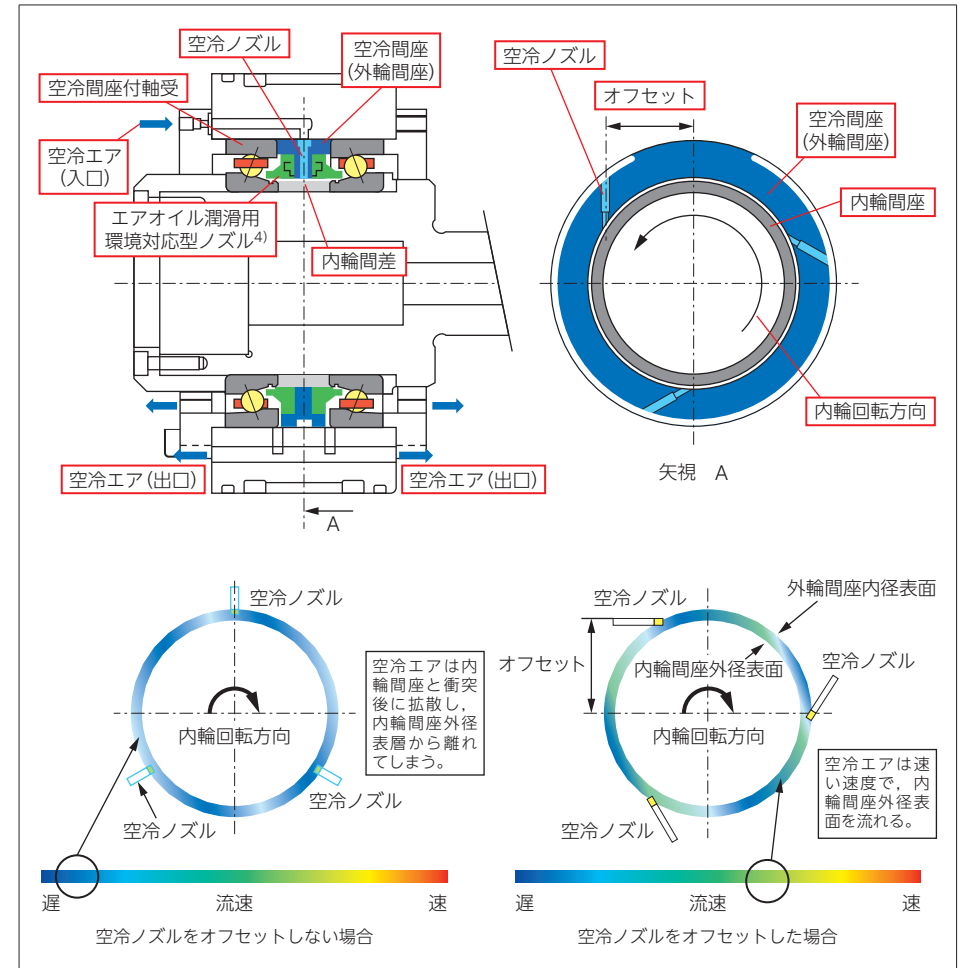


図 8.5 工作機間座内における空冷エアの流れ

本例のように、空冷時など空気流れのみを考慮すればよく、流れが時間変化しないと仮定できる場合には、CFD が大きな効力を発揮し、十分な精度で放熱条件を予測することができる。

一方、実際の軸受利用下においては、多くの場合潤滑剤は空気と混ざり合い、時間変化を伴う複雑な挙動を示す。定常状態を仮定できる空気流れとは異なり、時々刻々と変化する流れを適切な時間刻みで解かなくてはならず、数値計算に必要なコストが飛躍的に増大する。このような条件下で計算する場合には、実測データに一致するよう熱伝達率を求め、試験条件から大きくはずれない範囲で温度解析を行うことも多い。

8.2.3 軸受内部の温度分布

2.2.3 にて示したように、内輪と外輪の温度差は、運転中の軸受のすきま・予圧量に直結するため、軸受選定・設計上非常に重要な要素である。軸受メーカーのカatalog等にはこの温度差の概略推定値が記載されている。

多くの軸受検討では、この概略推定値の上下限をとって計算を行い、安全を見た初期すきま、予圧量などを選定する。

軸受の内外輪温度差をあらかじめ計算したい場合、簡易な計算方法としては熱回路網法による方法がある。熱回路網法では、以下のように軸受を含む周囲構造から、計算点（以下ノード）を複数抽出し、各ノード間の熱関係式を立て、温度ノードに流入出する熱の総和が0（すなわち熱的平衡）となる各ノードの温度を解くものである。図 8.6 に概略図を示す。

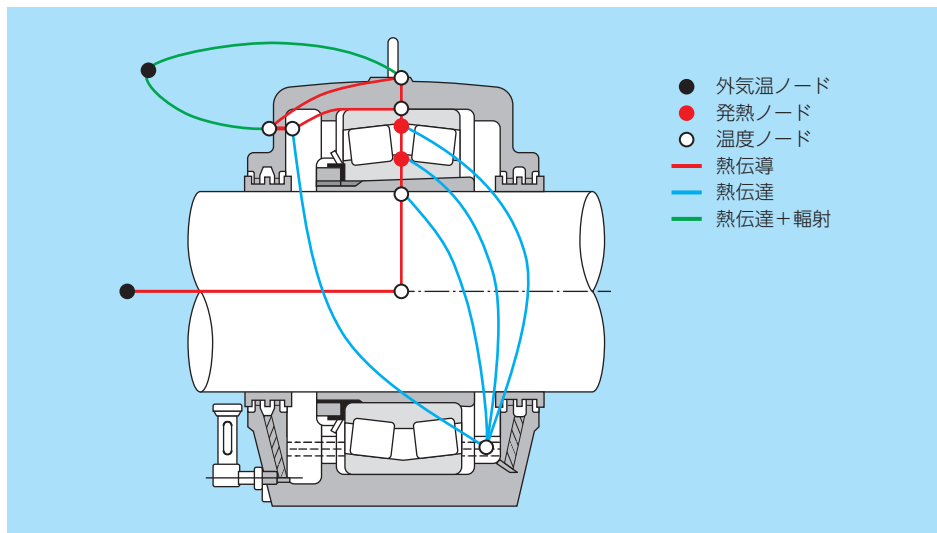


図 8.6 熱回路網法の概略図

熱回路網法では、いったん試験に一致するモデルを確立してしまえば、入力値（たとえば外気温）の変化による各ノードの温度変化を簡単に計算できる。しかし、ノード間の熱流れを数式化する際に多くの仮定が必要となることや、ノードまわりの詳細な温度分布を考慮することができないことなどから、十分な検討が行えないこともままある。

熱回路網法よりもさらに詳細な温度分布が必要な場合、FEM を用いる。事例を図 8.7 に示す。

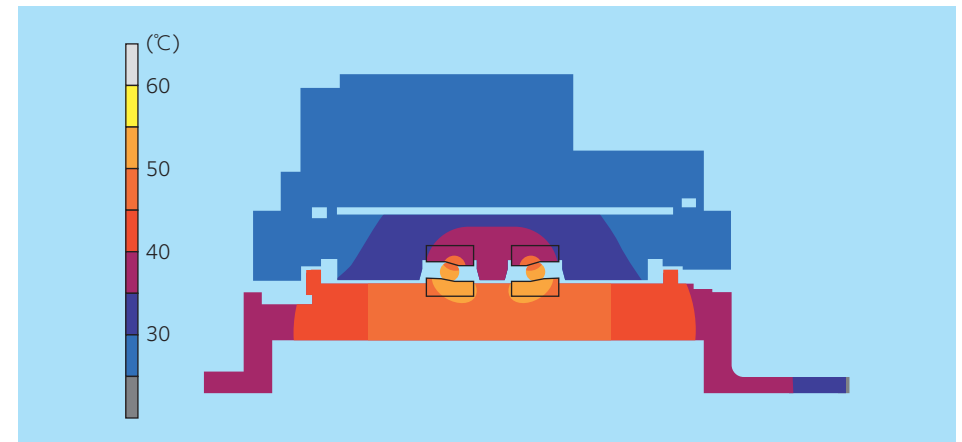


図 8.7 FEM による温度分布計算例

図 8.7 は、軸受とその周囲部品の熱解析事例である。軸受の熱は、主に軌道輪と転動体の接触部から発生するため、上記 FEM モデルでは転動体接触部に熱源を設定している。発熱量は前節の通りトルク計算値と軸受回転速度より導出し、各 부품の表面に、熱伝達率および周囲温度を設定する。固体同士の接触部は、完全な接触とすることもあれば、接触状態に応じて熱抵抗が設定されることもある。

この FEM 解析から得られる温度分布をトルク計算と連成させることで、正確な内輪と外輪との温度差の推定、ひいては適切な初期すきま・予圧量を設定することができる。

8.3 保持器, シールの計算

本ガイドでは、軸受部品として主に転動体、内輪、外輪を取り扱った。このほか、転動体を等間隔に保持するための保持器、および潤滑剤の密閉や防塵のために利用されるシールも、軸受の性能を決定する重要な要素である。

8.3.1 保持器の遠心力による拡張

高速回転下で使用される軸受の樹脂製冠形保持器は、図 8.8 に示すように、遠心力により比較的大きな変形が発生する。この変形によって他部品との干渉が発生すると、過大発熱の原因となる。このため、保持器に求められる特性として、他部品と干渉しないこと、また遠心力による発生応力が材料強度を満たすことが必要であり、その検証に FEM が活用されている。図 8.9 に解析例を示す。

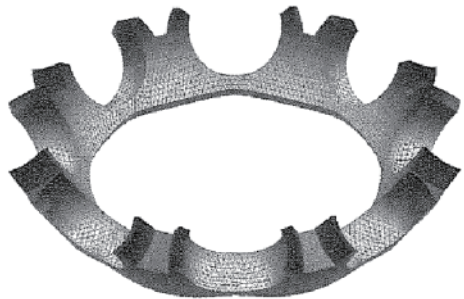


図 8.8 樹脂製冠形保持器の遠心力による変形 (10 倍表示)

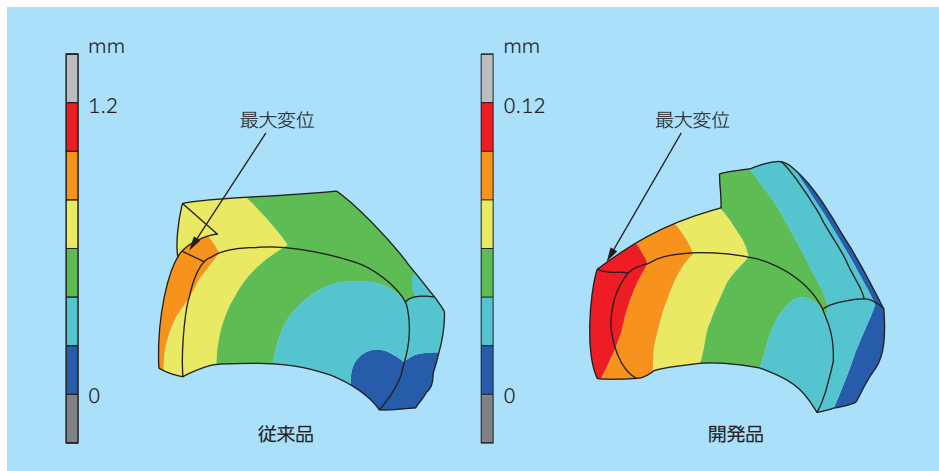


図 8.9 樹脂製冠形保持器の FEM 解析例

8.3.2 保持器の動的な応力解析

基本的に保持器は、転動体を均等に保持する用途で使用され、荷重を受けない仕様のため、静的な状態では、転動体と保持器との間に荷重は発生しない。

しかし、例えば、急加減速運転条件などにおいては、転動体が円周方向の加速度を持つため、転動体と保持器との間に荷重が発生する。このような条件での保持器応力計算が必要な場合は、動力学解析を用いる。事例を図 8.10、図 8.11 に示す。

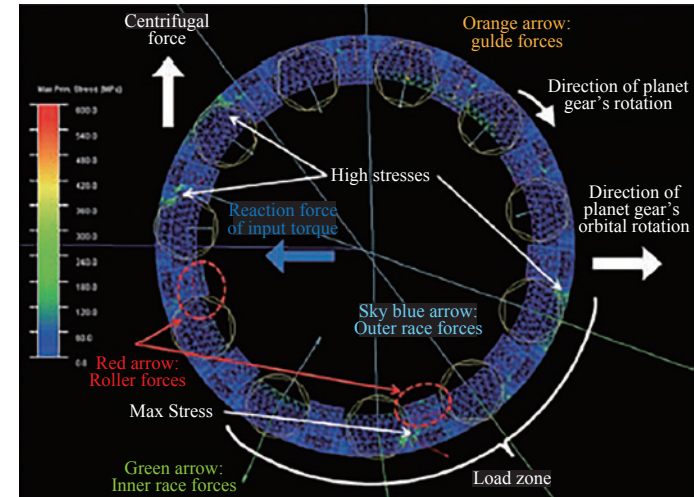


図 8.10 遊星運動下の軸受保持器が受ける荷重と発生応力

この事例では、遊星運動（軸受が回転しながら、軸受全体も高速で振り回される）する針状ころ軸受において、保持器に発生する応力を求めている。

図 8.11 に、外輪-ころの接触応力と保持器応力の時間変化を示す。ここから、外輪-ころの接触応力が最大値から下がっていくとき、すなわち負荷圏を抜ける際に最も高い保持器応力が発生していることがわかる。またこれは、負荷圏を抜けたころが遠心力の影響を受け、保持器の公転を妨げる方向に荷重が発生させることが原因であることも、本解析結果から読み取れる。

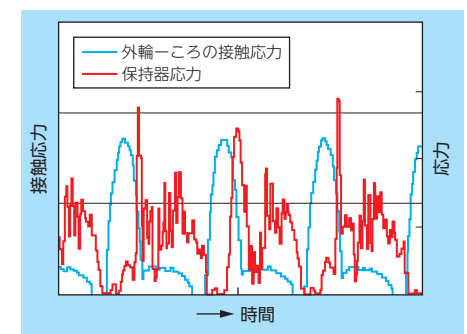


図 8.11 外輪-ころ間の接触応力と保持器応力の時系列変化

8.3.3 シール接触面圧解析

軸受シールに求められる機能は、密閉性あるいは防塵性と、低トルク（低発熱）性である。これらは相反する能力であることから、しばしば設計上の課題となる。

一般的な接触形のシールは鋼板の芯とゴム材で構成され、軌道輪と接触する際にゴム材のリップ部が大きく変形する。ゴム材は応力とひずみの関係が一部非線形であり、かつリップ部は大変形するために微小変形を前提とした力学が適用できない。そのため、この接触時の変形と接触応力の推定に、FEMが活用される。

以下の例は、低トルク化のため、軌道輪と接触するシールリップに微小突起を設けたシールの解析例である。シールが挿入後に変形したとき、シールリップの微小突起が点接触となるように設計がなされている。

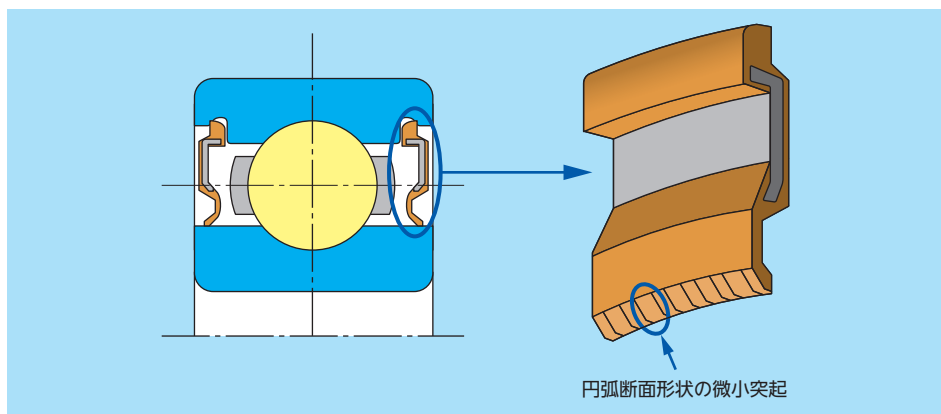


図 8.12 接触形ゴムシール

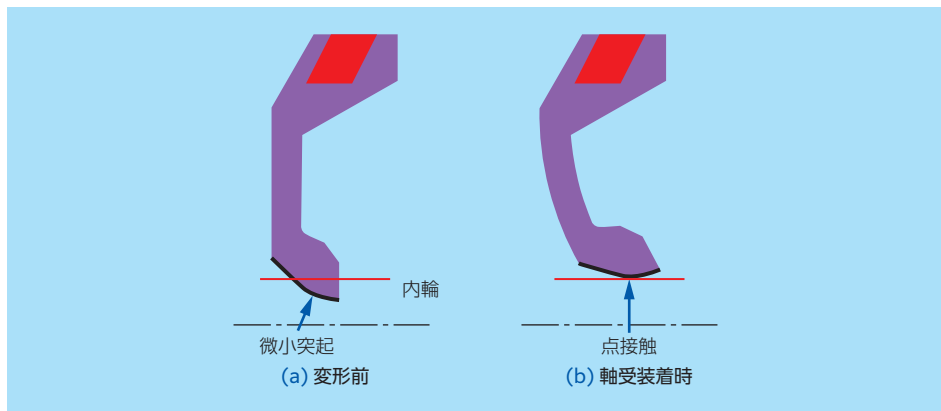


図 8.13 軸受装着時のシールリップ先端変形状

8.4 潤滑剤挙動計算

軸受の運転には潤滑剤が必須であり、種々の潤滑剤・潤滑方法が存在する。

最も一般的なのはメンテナンス性に優れたグリース潤滑であるが、油浴潤滑に代表される油潤滑も多数の潤滑方式が存在し、用途に合わせて利用される。

潤滑剤は軸受の円滑な回転のために必須である一方、過剰な潤滑剤供給は軸受トルクや発熱量の増加をもたらすため、適切な量の潤滑剤を適切な方法やタイミングで供給できるのが理想である。これらの推定に、流体解析の活用が進められている。

以下に、小型スピンドル内のグリース流れ解析の例を示す。

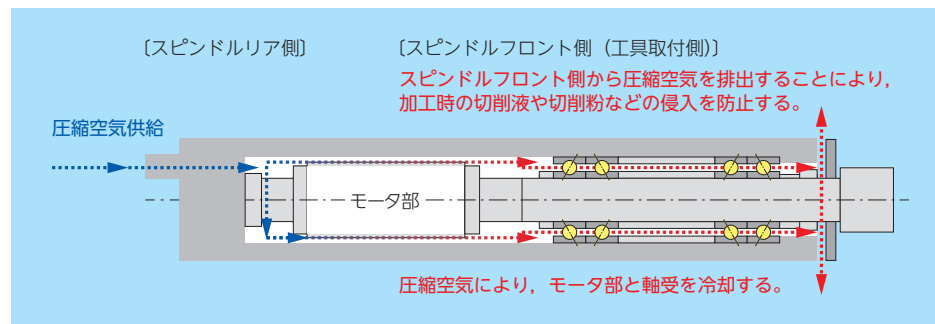


図 8.14 小型スピンドル例

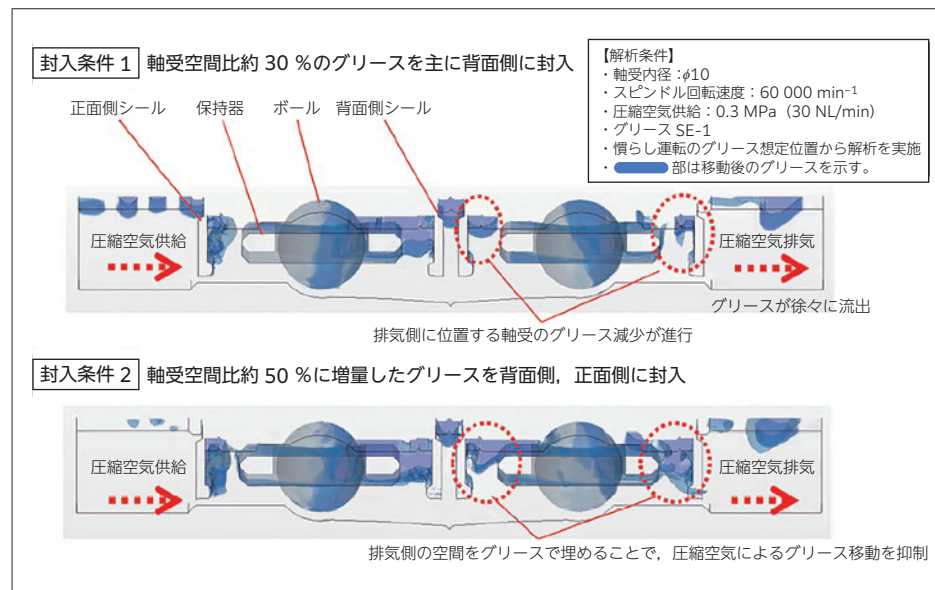


図 8.15 封入条件によるグリース残存量の差異

図 8.14 に小型スピンドルの概略図を示す。このスピンドルでは、モータおよび軸受の冷却と、切削粉等の異物侵入を防ぐ目的で、リア側から圧縮空気が供給される。軸受内部には潤滑のためグリースが封入されるが、高圧の圧縮空気が供給されると、空気流れによりグリースが流れ出てしまうという現象が起こる。

図 8.15 に、圧縮空気供給後のグリース残存量の解析結果を示す。グリースの封入位置および量を最適化することにより、軸受内に残留するグリース量を増加させ、主に排気側の潤滑条件の改善が可能であることが示された。

潤滑剤の流れ解析は、軸受温度計算の放熱の項で述べたように、本質的に非定常の現象であり、数値計算コストが高い。近年のコンピュータの発展により、現実的な計算で潤滑剤の流れ解析が行えるようになってきた。潤滑剤の挙動解析は盛んに研究開発が行われている途上であり、今後の発展が見込まれる。