

論文の内容の要旨

論文題目 ティルティングパッドジャーナル軸受の安定性に関する研究

氏 名 田浦 裕生

本論文は、ティルティングパッドジャーナル軸受の自励振動安定性を実験と理論により解析し、当該自励振動のメカニズムを解明して、自励振動の発生を防止するための軸受設計指針を提示したものである。

(第1章 序論)

すべり軸受でささえられた回転軸には軸受油膜の不安定化作用による自励振動(オイルウィップ)が発生することがあり、高速回転機械ではこの自励振動が絶対に発生しないようにすべり軸受を設計することが求められる。ティルティングパッドジャーナル軸受は他の形式のすべり軸受に比べて安定性が高く、ピボット回りの揺動運動についてのパッドの慣性モーメントを無視する従来の簡便な理論解析では不安定化作用をする油膜の連成ばね項が存在しなくなることから、原理的にオイルウィップは発生しないとされていた。しかし、最近のモデル実験あるいは実機の運転では、軸受荷重やパッドの予圧係数が小さいときにオイルウィップが発生したという報告がなされている。

従来の理論解析でも、ピボット点回りの揺動運動についてのパッドの慣性モーメントを考慮した場合は油膜の連成ばね項が存在することになり、慣性モーメントが大きい場合には連成ばね項も大きくなって、オイルウィップが発生することが予測される。しかし、この理論モデルでは慣性モーメントが実用上あり得ないほどの大きな値になってはじめてオイルウィップが発生することがわかり、実験的事実を説明することができない。また、軸回転同期周波数よりも低い周波数で軸が振れ回り、かつパッドがその周波数でピボット回りに揺動運動すると仮定して理論的に求めた油膜減衰が負となる場合があることから、ティルティングパッドジャーナル軸受のオイルウィップの原因は油膜の負減衰であるとする説もあるが、油膜の負減衰が実測された実験例は今までにないので、この説も説得力に欠ける。これらのことから、ティルティングパッドジャーナル軸受のオイルウィップを合理的に説明できる理論モデルは未だ提示されていないと言える。

そこで、ティルティングパッドジャーナル軸受のオイルウィップ発生メカニズムを合理的に説明できる理論モデルを新たに構築してそれを実験的に検証し、さらにその理論モデルに基づいて、安定な運転を可能とする軸受設計指針を提示することを本研究の目的とした。

この目的を達成するため、以下のような実験と理論解析を行った。まず、実験では、剛な回転軸上に油膜を介してティルティングパッドジャーナル軸受を浮上させる軸・軸受系、およびティルティングパッドジャーナル軸受によって弾性ロータを支える軸・軸受系の2つについてそれぞれ、パッド予圧係数、軸受荷重などを変化させてオイルウィップが発生する時の軸回転速度を計測した。なお、後者の系では、異なる2つの方法で軸受をハウジングへ取り付けて実験した。一方、理論解析では軸・軸受系の運動方程式を導出し、特性方程式の複素根の実部の符号から安定・不安定を判別する線形安定性解析を行った。その際使用する油膜のばね係数、減衰係数は、ティルティングパッドジャーナル軸受について従来から一般に使用されている主対角項のばね係数2つ、減衰係数2つの計4項のみではなくて、連成項や各パッドの揺動運動に対応する項を含んで $(10n+8)$ 個の項(ここで n はパッド枚数)により構成されるフルセットの油膜係数を使用する。この油膜係数は軸と軸受が並進相対運動するとして求めたものであり、軸受と軸が相対的に傾斜する場合は、それを考慮して求めた傾斜ばね係数、傾斜減衰係数を追加して使用する。

(第2章 ティルティングパッドジャーナル軸受の自励振動に関する実験解析、

第3章 ティルティングパッドジャーナル軸受の自励振動に関する理論解析)

まず、両端を転がり軸受で支えられた剛な回転軸のスパン中央部に、油膜を介してティルティングパッドジャーナル軸受を浮上させた軸・軸受系について解析した。実験では、軸受すき間、予圧係数、軸受荷重の大きさに依らず、ある回転速度以上になると軸受がコンカルモードの激しい振動を発生し、回転速度をさらに上げても振動が持続する。また、その振動数は回転非同期で軸回転周波数よりも低い。コンカルモードのため、軸受油膜の傾斜ばね係数、傾斜減衰係数を考慮して剛体軸上に浮上するティル

ティンパッドジャーナル軸受の線形安定性解析を行い、安定限界速度を理論的に求めたところ、安定限界速度が予圧係数と軸受荷重にほとんど依存しないという点については実験と理論が一致した。また、オイルウィップが発生する回転速度では傾斜ばね係数の連成項が大きな値になっていることが確認された。これにより、この軸・軸受系のオイルウィップ現象については本理論モデルにより合理的に説明可能となったが、理論的安定限界速度は実験値よりも若干低く、定量的な予測精度の向上が本モデルの課題である。

(第4章 ティルティンパッドジャーナル軸受に支持された弾性回転軸の安定性に関する実験解析、
第5章 ティルティンパッドジャーナル軸受に支持された弾性回転軸の安定性に関する理論解析)

第4, 5章では、先に解析した系と異なり、実際の回転機械と同じように軸受ハウジングに取り付けたティルティンパッドジャーナル軸受で回転軸を支える軸・軸受系について解析した。その意味で第4, 5章は本論文の中核的な章である。ただし、理論では軸の両端をティルティンパッドジャーナル軸受で支持しているのに対し、実験では容易に行うため、軸の一端を試験軸受であるティルティンパッドジャーナル軸受で支持し、他端は自動調心転がり軸受で支持している。回転体は軸受スパン中央部に単一の集中質量を有するジェフコットロータで、曲げ1次の危険速度が900 rpmの弾性ロータである。この軸・軸受系では、二つの異なる方法で軸受をハウジングに取り付けた。一つは、試験軸受を内部に装着した自動調心玉軸受をハウジングに取り付けるもので、ロータが曲げ1次モードで変形して回転軸中心線が試験軸受内で相対的に傾斜すると、油膜の傾斜ばね作用によってすべり軸受にモーメントが作用するので、玉軸受の自動調心作用により試験軸受も追従して傾斜する。したがって、運動方程式を構成する際に油膜反力の傾斜ばね項、傾斜減衰項を考慮する必要はない。これを軸受単純支持とよぶ。他方は試験軸受をハウジングに直接固定するもので、試験軸受内で軸が傾斜しても軸受はそれに追従して傾斜できない。このため、油膜の傾斜ばね作用、傾斜減衰作用が発生するので、それを考慮して運動方程式を構成する必要がある。これを軸受固定支持とよぶ。

まず実験を行った結果、軸受単純支持の場合は軸受荷重、予圧係数の値に依らず、実験の上限度(7500 rpm)まで増速してもオイルウィップが発生せず、安定であった。これに対し、軸受固定支持の場合は、予圧係数、軸受荷重に依らず5000rpm前後になるとオイルウィップが必ず発生するという結果になった。

続いて、油膜反力の傾斜ばね項、傾斜減衰項を考慮しないで済む軸受単純支持の系の運動方程式を立てて複素固有値解析を行い、安定限界線図を求めた。この安定限界線図は本研究により初めて求められたものである。これより、予圧係数が小さい場合は、軸受定数が増加する(たとえば軸受荷重の低下、油膜粘度の増加、軸受すきまの低下など)とともに安定限界速度は単調に低下して比較的低い軸回転速度で一定の下限値に収束するので、軸受定数の高い領域には不安定領域が広く存在する。一方、予圧係数が0.15より大きい場合は、軸受定数の小さい領域で比較的高い軸回転速度の範囲内においてのみ不安定になるだけで、それ以外は広く安定領域が存在することがわかった。実験結果と比較すると、予圧係数が高い場合に非常に高回転速度まで安定であるという点で実験結果と整合する。しかし、予圧係数が低い場合の実験において理論安定限界回転速度に達してもオイルウィップが発生していないという点で理論モデルと一致しない(特に軸受荷重が小さい場合)。この原因についてはまだ究明できていない。

油膜反力の傾斜ばね項、傾斜減衰項を考慮する必要のある軸受固定支持の場合についても、同様に複素固有値解析を行って、初めて安定限界線図を提示した。得られた線図は、全て予圧係数について、軸受単純支持の予圧係数が小さな場合と基本的にほぼ一致しており、予圧係数が大きくなっても安定限界線に大きな変化がないという点で軸受単純支持の場合と異なっている。実験結果と比較すると、安定限界速度は予圧係数と軸受荷重にあまり依存しないという定性的な特徴は一致するものの、安定限界速度の理論値は実験値よりも低い。これは、実験装置では軸の他端を転がり軸受で支えているため、系を不安定化させる油膜反力の傾斜ばね連成項の影響が理論モデルの半分の小ささになっているためと考えられる。

(第6章 結論)

並進運動のフルセットの油膜係数と傾斜運動の油膜の傾斜ばね係数、傾斜減衰係数とを組み合わせ、線形振動解析の手法によりティルティンパッドジャーナル軸受でささえた回転軸の安定線図を求め、当該軸受のオイルウィップ発生メカニズムを理論モデルにより説明することができる。

軸受単純支持となるような軸受取付けとすることにより、つりあい共振応答振幅を増大させる危険を招く予圧係数の増加を行うことなく、広い安定な運転領域を確保することができる。

以上