

報告番号	甲 第 14187 号
------	-------------

主 論 文 の 要 旨

論文題目 円弧ばね型油膜ダンパの動特性に関する研究
(On the dynamic characteristics of circular-arc
spring dampers)

氏 名 武内 遼太

論 文 内 容 の 要 旨

エネルギー需要の増大，温室効果ガス削減の要請，製品のライフサイクルコスト低減の要求などを背景として，多段遠心圧縮機，航空エンジン，蒸気タービン等の各種ターボ機械において小型・軽量化や出力・効率の向上がますます求められるようになってきている。その結果，軸系は柔構造化／高速化し，また，軸系に作用する流体力が増大することで，不釣り合い等による強制振動や，羽根車・シールなどの流体力等による自励振動の危険性が高まる。一般に，これらへの最も効果的な対策手段として，流体の粘性抵抗を利用したスクイズフィルムダンパ (Squeeze Film Damper : SFD) により，軸系に減衰を与えることが行われる。典型的な SFD は，油が満たされた油膜すきま (ラジアルすきま)，すきま変化を少なくすることで減衰性能を安定させるセンタリングばね，減衰能力を高めるためのエンドシールなどからなる。これまで，さまざまな形式の SFD が提案され，それらの動的特性が解析・実験の両面から研究されるとともに，各種ターボ機械への適用が行われてきた。

近年，新たな形式の SFD として円弧バネ型ダンパ (Circular Arc Spring Damper : CASD) が提案されている。CASD はワイヤ放電加工 (Wire Electric Discharge Machining : WEDM) によって複数の円弧状のセンタリングばねと 2 重の油膜すきまを形成したもので，その最大の特徴は，軸方向にも径方向にもコンパクトにセンタリング機能を実現できることである。大型ロータを支えられる剛性を持たせることも可能であり，また，接触部やエラストマ要素を持たないため耐久性が高い。さらに，一体品からの WEDM によりラジアルすきまの大きさを管理しやすく，減衰性能のコントロールが容易である。

以上のように，CASD は従来の SFD と比較して多数の優れた特徴を持ち，各種ターボ機

械に対して適用することで、それらの信頼性および性能を向上することができる。しかし、CASD の実際の機械への適用例はいまだ報告されていない。その理由として、CASD に対する研究は特定のグループによるもの以外に存在せず、その動的特性や作動メカニズムの理解、予測設計の手法、検証試験がいずれも不十分であることが挙げられる。そこで、本研究では、CASD に関する既存研究で明らかにされていないことのうち、特に重要であると思われる以下の 3 点について研究を行った：

- ① CASD の動特性係数、およびそれらに対する形状の影響の理解
- ② CASD の動特性予測手法の構築と油膜力に対する考察
- ③ 実機械への CASD の適用検証

以下、各項目について本研究で取り組んだ内容と成果を述べる。なお、上記 3 点はいずれも CASD という特定の形式のダンパに関する研究であるが、②については、CASD に限らず、油膜減衰を利用する他の機械要素の解析にも広く利用することが可能である。

①に関しては、CASD を実機に適用していくにあたり、まずは CASD の反力をどのような動特性で表現するのが適切かを明らかにし、次にそれらの動特性が、CASD の各部の形状によってどのような影響を受けるかを理解することが必要となる。まず、動特性の表現方法については、従来の SFD では構造部分（センタリングばね）と流体部分（油膜）が並列に配置されているため両者の反力をそれぞれ独立な動特性係数で表すことが可能であるが、CASD では円弧ばねと油膜が入り組んで配置されているため、このような取扱いは自明ではない。また、CASD の油膜部分の動特性係数に関しては、既存研究では減衰係数の主対角項のみで表現しているが、本来 Navier - Stokes 方程式の慣性項の影響は無視できず、慣性係数で表される反力成分（付加質量効果）が発生することが想定され、また、CASD は軸線と直角な方向に対して非対称な形状をもつため、連成項（非対角項）が発生する可能性があった。そこで、本研究では、最初に CASD の動特性の表現方法について理論的考察を行い、小振幅・低周波数の条件下であれば、従来の SFD と同様の構造・油膜分離表現が可能であることを示した。さらに小振幅・低周波条件での加振試験を行い、上記表現形式の妥当性を実験的にも示した。また、CASD が実用上無視できない慣性係数を発生すること、減衰係数および慣性係数の連成項は小さいことを初めて明らかにした。次に、形状の影響については、既存研究は全て円弧ばねの数が 2 個のもの（2 円弧型）を対象に行われており、また、同一の外径寸法でラジアルすきまやエンドシールすきまを変更した場合の影響については調べられていなかった。そこで、本研究では、同一の外径寸法で、円弧数やラジアルすきま・エンドシールすきまの異なる数種類の CASD に対して加振実験を行い、これらの形状パラメータの影響を調べた。その結果、円弧数が 4 個のもの（4 円弧型）が 2 円弧型の 2 倍程度の減衰係数を発生可能なこと、エンドシールすきまが小さいほど減衰係数および慣性係数が著しく増大すること、ラジアルすきまが極端に大きい場合（ダッシュポット型）でも十分な減数係数を発生できるが慣性係数の影響はより大きくなること、などの新たな知見を得た。

②に関しては、CASDの実機適用のためにはその反力を予測し、適切な動特性が得られるよう設計することが必要である。また、CASDの適切な使用と今後の改良のためには、その内部（特に油膜部分）でどのように反力が発生しているかを正しく把握する必要がある。しかし、既存研究では、油膜を含めた動特性予測手法の検討は行われておらず、また、油膜反力発生の様相については全く考察が行われていない。そこで、本研究では、CASDの動特性予測および油膜反力の発生状況把握を目的として、CASD内部の油膜流れの数値的解析手法の構築を行った。CASDの解析においては、従来型SFDと同様、給排油構造、キャビテーション、および流体慣性の影響を考慮する必要がある。さらに、CASD特有の難しさとして、円弧ばねと油膜流れの流体構造連成（Fluid-Structure Interaction：FSI）が挙げられる。すなわち、CASDでは、ロータが偏心したときのラジアルすきまの分布は円弧ばねの変形から決まり、その一方で、円弧ばねの変形は、ラジアルすきまの分布によって生じた油膜圧力の影響を受ける。つまり、双方向（2-way）のFSIがCASDにおける反力発生を支配している。以上の現象を正確、簡便、かつ統一されたやり方で取り扱うには、数値流体力学（Computational Fluid Dynamics：CFD）による油膜解析と有限要素法（Finite Element Method：FEM）による構造解析を連成させて解く方法が望ましい。本研究では、このような数値的FSI解析のフローを構築した。また、加振実験との比較により、本手法がCASDの動特性を高い精度で予測できることを示した。さらに、数値シミュレーション結果を詳細に分析することで、4円弧型CASDの油膜反力についていくつか考察を行った。

③に関しては、実機と同等の軸受やロータと組み合わせたシステムレベルでの検証試験が必要である。既存研究のCASDの実験はいずれもコンポーネントレベルの加振試験であり、実機械へのCASDの適用にあたっては、システムレベルの試験により、実機相当の環境における減衰性能や運用性を検証する必要がある。本研究では、代表的なターボ機械の一つであるガス圧送用の多段遠心圧縮機を例にとり、CASDの実機械への適用を検証した。まず、柔構造かつ高速な実在の多段遠心圧縮機をモデルケースとし、ティルティングパッドすべり軸受とCASDを組み合わせたダンパ軸受を設計製作した。さらに、製作したダンパ軸受を、実機を模擬したフルスケールのダミーロータに搭載し、高速バランシング設備を用いた回転試験を実施した。その結果、開発したダンパ軸受が従来型のすべり軸受（ダンパなし）に比べて高い振動低減効果を持つこと、また、軸受としての機能に問題が無いことを確かめた。

①で特性と形状パラメータの影響が明らかになったこと、および、②で解析手段が確立されたことで、CASDを軸系に合わせて最適に設計することが可能になった。さらに③により多段遠心圧縮機への適用可能性が実証できたことで、これまでラボレベルの研究にとどまっていたCASDを実機械に適用できる準備が整ったと言える。また、CASDに限らず、今後、軽量コンパクト化の要請や加工技術の発展により、構造と油膜が双方向に連成する減衰機構は増えていくと予想されるが、②で構築した数値シミュレーション手法は、これ

らの設計や現象理解にも役立つものとする。

以上