

報告番号	※ 甲 第 1109'7 号
------	----------------

主 論 文 の 要 旨

論文題目 ヘリコプタ前進飛行時のロータ・ワール安定性

氏 名 中山 周一

論 文 内 容 の 要 旨

空気力学と弾性力学が連成した不安定現象としてフラッタが知られている。タービンに代表される回転機械では運動方程式におけるジャイロ項の作用により、回転軸まわりのふれまわり（ワール）運動をとまなう不安定現象が問題となることがしばしばある。航空分野においては、空力弾性が焦点となる回転機械としてプロペラがあり、プロペラが回転軸周りにふれまわり（ワール）運動するプロペラ・フラッタについて研究がすすめられてきた。

ヘリコプタにおいても、米国機の開発時にロータがふれまわり運動する不安定現象が発生したとの報告がある。試作機の地上ロータランにおいて、ロータを支持するマスト構造の曲げモーメントが発散傾向を示したものであり、ロータを支持するマスト構造の弾性変形とロータに働く空気力が連成した空力弾性問題とされている。国産機種においても、ロータを支持するトランスミッション部の弾性変形モード（トランスミッションピッチモード）が高速飛行時に不安定化し、6.7Hz 振動と呼ばれる振動が発生した事例がある。国産機では、6.7Hz 振動対策として本振動発生領域を搭乗員に認知させる機能（振動警報機能）、振動の増大を抑制する機能（ディセンシタイザ）が導入された。このトランスミッションモードの不安定化は、特定の速度を超える領域で発生することから高速飛行時の空気力学が関与した空力弾性問題である。

一般的なプロペラではブレードはハブに剛結合されているのに対し、ヘリコプタ・ロータではブレードはハブに対し回転運動が可能なヒンジ結合となっており、マルチボディ系を構成している。加えて、プロペラの空気力学条件は基本的に軸対称であるのに対し、国産機のワール不安定は高速飛行時に発生するので、ブレードの空気力学的条件は回転軸対称ではなく、方位角にも依存している。以上のようなヘリコプタ・ロータの特徴から、ヘリコプタ・ロータのワール不安定現象については、プロペラのワール・フラッタとは別の取り組みが必要である。この2機種についてのこれまでの事例報告では、製造会社所有の数値計算プログラムによる個別の検討結果が報告されているだけであり、ヘリコプタ・ロータのワール不安定現象一般についての基礎方程式や不安定化メカニズム等は明らかにされ

ていない。

本研究の目的は、国産ヘリコプタ実機のトランスミッションピッチモードの不安定化メカニズムを明らかにすることにより、ヘリコプタ・ロータのワール不安定現象について知見を得ることである。

4枚ブレードのヘリコプタ・ロータについて、トランスミッション部などに対応する支持系を含む10自由度の運動方程式を導出した。空気力を考慮しない場合、この運動方程式はハブ運動とブレードのラグ運動（ロータ回転面内の運動）から構成される系と、ブレードのフラップ運動（ロータ回転面外の角運動）の系に分離される。対向するブレードのラグ運動が同相となる場合、ブレード4本を合わせた重心位置はハブに一致するが、対向するブレードのラグ運動が同相ではない場合、ブレード4本を合わせた重心位置はハブ位置からオフセットし、ハブ運動を誘起する。ブレードのラグ運動変数（ラグ角）4つを、対向するブレードどうしのラグ角の和の2つと、差の2つに取りなおすと、ブレード4本の重心位置がハブに一致する場合は、対向するブレードのラグ角差はゼロとなり、ラグ角差はハブ運動とは独立になる。ハブ運動と連成するのは対向するブレードのラグ角和であり、この系の自由度はハブ運動の2自由度と、ラグ角和の2自由度を合わせて4自由度となる。このハブ・ラグ連成系の4つのモードは、ジャイロ項の影響によりいずれもハブがワール運動する。これらの4つのモードは、ロータ回転周波数がゼロの時に固有振動数がゼロとなる2つのモードと、ロータ回転周波数がゼロの時に支持系の剛性により決まるゼロではない固有振動数を持つ2つのモードに分かれる。後者がトランスミッションピッチモードに対応し、プロペラのワール・フラッタと類似のモードである。

次に、実機を想定した前進飛行時のブレード空気力を算出し、前進飛行の数値計算を行った。空気力については、米国機でのワール不安定検討事例を参考に、ロータ・ハブの運動によりブレード・ピッチ角の変動が発生するモデルを採用した。ヘリコプタの前進飛行時、ブレードの運動はロータ回転周波数に応じた周期的な運動となるので、その周期解周りの変動について線形化運動方程式を導出した。この線形化運動方程式の空力係数はロータ回転にともない周期的に変化する。周期係数を有する系の安定性評価としてFloquetの定理を適用した結果、特定の速度以上で、ワールモード（トランスミッションピッチモード）が不安定化する結果が得られた。この不安定現象は、前述のハブ運動によりブレード・ピッチ角変動が誘起される場合には発生するが、ブレード・ピッチ角変動が誘起されない場合には不安定現象は発生しない。さらに、飛行条件を変化させて不安定化する条件を探ったところ、実機での振動発生条件とほぼ一致する結果が得られた。

最後に、ワール不安定の発生メカニズムを解析的に検討した。モード解析に用いた空気力なしの定係数の運動方程式に対し数値計算に用いた線形化空気力を付加し、モード解析から導出される一般解の定係数が空気力を付加することにより時間変化するものとみなして、定数変化法を適用した。解を構成する係数に関する微分方程式の係数行列は、固有振動数と空力加振周波数の和や差で構成され、この値がゼロに近づく場合に係数（解）の安定性に影響する。不安定化したワールモードとブレードのラグ運動モードの間の連成空気力は、ロータ回転周波数の整数倍の周波数成分を持ち、両者の固有振動数差に近接する。この組み合わせについて係数（解）の安定性を評価したところ、不安定化作用であることが分かった。これは、運動方程式の係数が周期変化することによる不安定なので、パラメー

タ共振（または係数励起振動）に分類される。ワールモードと他のモードの連成空力項によるパラメータ共振の可能性にはいくつかの組み合わせがあるが、不安定となるか否かは連成空気力の位相関係に決まっていることがわかった。固有振動数と空力加振周波数の和や差がゼロに近づくことで発生するパラメータ共振を回避する方法として、ロータ回転周波数を変化させることがあげられる。ロータ回転周波数を変化させた場合の定数変化法の解析によれば、実機のロータ回転周波数を下げることでパラメータ共振を回避できるとの結果となった。この解析結果は、実機において、ロータ回転周波数を下げた飛行試験では振動が発生しなかったとの試験結果に一致しており、実機のトランスミッションピッチモードの不安定化には、パラメータ共振が関与していたと考えられる。ロータ回転周波数を変える以外のパラメータ共振を回避する方法として、トランスミッション支持剛性を高くする効果について検討としたところ、パラメータ共振を回避し安定化する効果があることがわかった。

以上、線形時変モデルによる数値計算結果を Floquet の定理により安定判別した結果は実機での振動発生条件にほぼ一致していること、数値計算モデルに対し定数変化法を適用した解析結果はパラメータ共振による不安定化を示していること、ロータ回転数を下げることでパラメータ共振を外れるとの解析結果はロータ回転周波数を下げた飛行試験では振動は発生しなかったとの試験結果に整合していることから、本研究での数値計算および解析により実機におけるトランスミッションピッチモード不安定化の原因は究明されたと考える。また、一般的に、マルチボディ系であるヘリコプタ・ロータは多くの固有モードを有すること、ブレード空気力はロータ回転周波数の高調波成分を有することから、実機検討事例と同様なパラメータ共振が他機種で発生する可能性がある。ヘリコプタ・ロータについてパラメータ共振を適用した類例はなく、本研究を通じそれらの問題に対する新たな知見が得られた。