

学位論文題名

ディスク・ブレード連成系の振動に関する基礎的研究

学位論文内容の要旨

本研究では、複雑な形状をした機械構造物を等価な力学モデルに置き換えた「接続系」の振動問題をリッツ法により解析するため、接続条件の取り扱いや、数値計算の安定性などの点で問題が多く、扱いづらいとされてきたディスク・ブレード連成系を取り上げ、その振動解析法と振動特性に関する基礎的な研究を行った。ここではディスク・ブレード連成系を、内周が固定され、外周が自由な有孔円板と、ディスクの外周上に取り付けられた長方形断面を有するはりとの接続系としてモデル化し、その振動解析をリッツ法を用いて行った。本論文は全6章で構成されており、その概要を以下に述べる。

第1章は緒論であり、本研究の目的と意義について述べると共に、ディスク・ブレード連成系の振動解析、仮想ばねを導入したリッツ法による接続系の解析、リッツ法の試験関数として直交多項式の使用、などに関するこれまでの研究動向と各章の概要を述べた。

第2章では、接続系の振動解析をリッツ法で行う際に重要な問題となる試験関数の境界条件と接続条件の取り扱いについて述べ、変位関数に用いる試験関数の幾何学的境界条件に接続条件を取り込む方法と接続点に仮想ばねを導入して接続条件を満たす方法とに関して、それぞれその妥当性と有効性について検討した。そして仮想ばねを導入して接続条件を扱う方法により、境界条件や接続条件を特に意識せずに試験関数を選ぶことができ、これに加えて直交性のある関数を用いることにより運動エネルギーから導かれる係数マトリクスを完全に対角行列とすることができるため、仮想ばねの導入と直交性のある関数とを併用することでリッツ法による振動解析に際して極めて有効であることを、理論解析ならびに数値計算により示した。

第3章では、接続点に仮想ばねを導入して接続条件を満足させ、変位関数の試験関数に直交性のある関数を用る方法によりディスク・ブレード連成系の自由振動の解析を行った。まず、仮想ばねによるポテンシャルエネルギーを含む系の各エネルギー表示式を与え、次にグラム・シュミットの直交化法による直交多項式の構成の手順を示し、それを用いてブレードに対する試験関数を構成した。ディスク部分の試験関数としては、有孔円板の固有関数を用いた。いずれの関数も直交性を持つ関数である。その後、リッツ法により振動数方程式を導出したがここで用いた手法により、振動数方程式の右辺の係数マトリクスを対角マトリクスとすることができる。ディスク・ブレード連成系のような大規模で複雑な問題に対しても安定して数値計算を行うことができることを示した。また、ディスク上に付加部材が周期対称に配置されている場合には、ディスクの振動形は周方向波数成分と付加部材の数との間に成り

立つある特定の関係を満たすいくつかのグループ（型）に分けられることを明らかにした。そして、数値計算を行って系の固有振動数パラメータ、振動モードを求め、ディスク・ブレード連成系の振動が、ディスクあるいはブレードのどちらか一方の振動変位が卓越するそれぞれの主共振モードと、両者が共に大きく振動する強連成モードとから成ることを示した。また、シュラウドの有無による振動数パラメータや振動モード形への影響、ブレードの本数と振動数パラメータの関係、などについて調べ、さらに、ブレードの長さやディスクの半径との比を変えて振動数パラメータの計算を行い、強連成モードはディスクの固有振動数とブレードの固有振動数が接近するときに、特定のモードの振動数曲線がヴィーリングしたものであることを明らかにした。

第4章では、系の持つ基本的な振動特性を応答特性の面から調べるために、ディスクあるいはブレード上の一点に調和的な集中外力が作用する場合の系の定常応答の解析を行った。そのために、系の各エネルギーに加えて調和外力による仕事を求め、ラグランジュの方程式を用いて系の運動方程式を導いた。その際に、ディスクとブレードそれぞれの曲げこわさを、内部減衰を考慮した複素量で近似し、変位の試験関数については第3章と同様の関数を用いた。そして、数値計算を行って励振振動数に対する系の応答曲線を求め、第3章の解析で得られたディスク・ブレード連成系の基本的な振動特性が応答曲線に現れることを示すとともに、内部減衰の大きさ、励振点の位置、シュラウドの有無、ディスクとブレードのこわさ比等が応答変位、共振振動数、反共振振動数などの系の応答特性に与える影響について検討した。

第5章では、実際のタービンシステムにより近いモデルとするため、回転による効果を考慮した解析を行った。このため、前章までの解析で用いた各エネルギーに加え、ディスクとブレードに作用する遠心力によるポテンシャルエネルギーを考え、接続点に仮想ばねを導入し、直交性のある関数を試験関数に用いたリッツ法により振動数方程式を導いた。その際、本章ではより一般的なモデルを想定し、ディスクの周方向の変位関数を余弦関数と正弦関数の両者を考慮して展開した。これにより、任意のブレードにミスチューンが存在するような、より一般的なディスク・ブレード連成系の取り扱いが可能となった。また、ブレードの試験関数とともにディスクの半径方向の試験関数にもグラム・シュミットの直交化法により構成される直交多項式を用いた。これによって前章までの解析に比べて試験関数の計算がもっとも簡単になるとともに、より多くのブレードが接続された系に対しても数値計算を安定に実施することが可能となった。このようにして導かれた振動数方程式を用いて数値計算を行い、得られた結果の一部については、市販されている有限要素法ソフトによる計算結果との比較を行い、本解析法の妥当性を確認するとともにFEMに対する計算コストの点での優位性を示した。また、回転速度やブレードの本数、シュラウドの有無など、さまざまな条件を変化させてそれらが振動数、振動モードに与える影響について考察を行った。これらに加えてここでは、シュラウドの質量をブレードに付加された集中質量とみなした解析も行い、わずかな変更でシュラウドの質量を考慮したモデルにも拡張することができることを示した。この場合、直交多項式を構成する際の重み関数にディラックの δ 関数が含まれるが、そのような場合でも直交多項式の構成にはまったく問題はなく、得られる多項式の直交性も良好であることを示した。そしてシュラウドの質量、取り付け位置を変化させて数値計算を行い、ブレードの主共振モードについてはシュラウド質量を考慮した場合としない場合とで

大きな差が生じることを明らかにした。

第6章は結論であり、本研究を通じて得られた成果を取りまとめた。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 山 田 元
副 査 教 授 岸 田 路 也
副 査 教 授 三 上 隆

学 位 論 文 題 名

ディスク・ブレード連成系の振動に関する基礎的研究

複雑な形状をしている機械構造物の振動解析を行なうためには、構造物を、それを構成するいくつかの構造要素に分解し、これら要素の接続系として解析モデルを構築し、そのモデルに関して解析を行なう必要がある。

本論文は、ディスク・ブレード連成系を、内周が固定され、外周が自由な有孔円板の外周上に、長方形断面を有するはりを取り付けられている接続系としてモデル化し、リッツ法を用いて振動解析を行なうための接続条件の取り扱いと数値計算の安定化に関する基礎的な研究を行なったもので、その主要な成果は次の点に要約される。

[1]接続系の振動解析にリッツ法を適用する際、用いる試験関数の境界条件と接続条件の取り扱い方を検討し、直交性を有する試験関数を採用し、接続点に仮想ばねを導入するのが極めて有効であることを、理論解析と数値計算結果から明らかにした。

[2]接続点に仮想ばねを導入して接続条件を満足させ、変位の試験関数に直交性のある関数を用いたリッツ法を適用してディスク・ブレード連成系の自由振動を解析した。その結果、連成系の振動が、ディスクあるいはブレードのどちらか一方の振動変位が卓越している主振動モードと両者が共に振動する強連成モードとから成ること、シュラウドの有無による固有振動数や振動モードへの影響あるいはブレードの本数と振動数との関係などを明らかにするとともに、この方法の有用性を検証した。また、ディスクあるいはブレード上の一点に調和的な集中励振力が作用するときの系の定常応答を求め、連成系の応答に及ぼす内部減衰の効果についても検討した。

[3]実際のタービンシステムに、より近いモデルを実現するため、回転による効果を考慮し、系の運動エネルギーとひずみエネルギーに加えて、ディスクとブレードに作用する遠心力によるポテンシャルエネルギーを求め、接続点に仮想ばねを導入し、直交性を有する関数を試験関数に用いたリッツ法に基づいて振動数方程式を導いた。数値計算の結果、回転速度、ブレードの本数あるいはシュラウドの有無などが、系の固有振動数、振動モードに及ぼす影響を考察した。また、有限要素法ソフトによる結果との比較も行ない、本解析法の妥当性を確認すると共に、計算効率の高い方法であることを示した。

これを要するに、著者は、ディスク・ブレード連成系の振動解析法とその振動特性を論じたもので、複雑な接続系の振動解析に有益な新知見を与えており、機械振動学の進歩に貢献するところ大なるものがある。

よって著者は、北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。