

氏 名	ふな ざき けん いち 船 崎 健 一
授 与 学 位	工 学 博 士
学位授与年月日	昭和 60 年 3 月 26 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 1 項
研究科，専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 機械工学専攻
学 位 論 文 題 目	うず度をもつ周期変動流れにあるタービン動翼列の 動的応答及び共振特性に関する研究
指 導 教 官	東北大学教授 西山 哲男
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 西山 哲男      東北大学教授 大宮司久明 東北大学教授 大場利三郎      東北大学教授 小林 陵二

## 論 文 内 容 要 旨

### 第 1 章 緒 論

ガスタービンや蒸気タービンは何段もの静，動翼列が干渉しながら相対運動しているため，静，動翼列は互いに周期変動流中で作動している。この周期変動流のうち，特に上流側静翼列からの粘性後流に起因するものは，下流側タービン動翼列の流力特性に重大な影響を与え，更に，タービン翼に強制外力としての周期変動流体力，モーメントを誘起し，羽根振動による疲労破壊や騒音の主因となっている。このように，タービンの性能向上，安全性信頼性確保という点から，上流側静翼列からの粘性後流に対するタービン動翼列の動的応答を解析し，その強制振動における共振特性を明らかにすることは重要な課題である。

上流側粘性後流によるタービン動翼列の強制振動問題は，固定翼列の粘性後流に対する動的応答問題と振動翼列の非定常特性問題とに分けられる。いずれの問題に対しても従来の解法は，タービン翼列のようにそり厚みの大きな場合に適用できず，このためタービン動翼列を扱った研究は極めて少数に止まっていた。ここに任意形状翼列から成るタービン動翼列についての非定常解析法の確立が望まれていた。

このような背景のもとで，本研究は

- i) 上流側静翼列からの粘性後流を非粘性周期変動うず有り流れとモデル化し，これに対するタービン動翼列の動的応答解析法，及び，振動タービン動翼列の非定常特性解析法を特異点法により

- 系統的に展開し、
- ii) 提示したそれぞれの解析法について、翼列風洞実験結果との比較を多角的に行ない、その有効性を検証し、
  - iii) 広範な数値計算例を通して、タービン動翼列の曲げねじり連成の共振応答の特徴を明らかにするとともに、
  - iv) 以上の二次元解析法に対して、三次元性の効果を明らかにするために、平行壁間にまたがる翼列の三次元周期変動うず有り流れに対する動的応答解析法を提示している。

## 第2章 周期変動うず有り流れにあるタービン動翼列の動的応答解析

上流側静翼列からの粘性後流を非粘性周期変動うず有り流れと見なし、これに対するタービン動翼列の動的応答解析法を特異点法により提示している。即ち、うず度は有限量の定常じょう乱速度で輸送されると仮定することにより、そり厚みの大きな翼列の定常負荷と周期変動流のうず度との干渉効果による周期変動流の変形が考慮され、これに基づき翼面上非定常束縛うず分布に関する第二種フレドホルム型積分方程式が誘導された。ここでは粘性後流の高次ハーモニク成分まで解析が可能であり、各ハーモニク成分の非定常特性のみならず、非定常特性全体の時間変動を明らかにできる。

数値計算では、タービン翼列について圧縮機翼列との差違を指摘するとともに、動、静翼列ピッチ比、流量係数等による非定常流体力の変化を明らかにし、高次ハーモニク成分までを含む非定常圧力分布、流体力等の非定常特性の時間変動の特徴を示している。

## 第3章 粘性後流列をよぎるタービン動翼列の非定常応答 (解析法の実験的研究)

粘性後流中にあるタービン動翼列の動的応答全般を二次元翼列風洞実験により明らかにするとともに、第2章で提示した解析法の信頼性を実験結果との比較によって検証している。

従来よりタービン動翼列の動的応答についての研究は、理論、実験とも少なく、解析法の開発とその定量的精度向上のために必要な実験データの蓄積が強く望まれている。このような背景のもとで、実験においては静翼列を摸した翼列上流の走行円柱列より粘性後流列を発生させ、このときの翼面上非定常圧力分布及び翼列下流の非定常全圧を測定している。その結果、非定常圧力分布、非定常流体力については第2章で提示した解析法はほぼ実験に近い値を与えることが得られ、その有効性が確認された。

## 第4章 曲げねじり振動するタービン動翼列の非定常特性

上流側静翼列からの粘性後流によりタービン動翼列には強制外力が作用する。これにより羽根を含む弾性振動系が強制振動を受け、共振に達したとき構造物に重大な破損が生ずる危険性がある。第4章ではこの強制振動問題を、周期変動うず有り流れに対する固定翼列の動的応答問題と一様流中での振動翼列の非定常特性問題とに分離している。前者は第2章で考察されており、後者につい

での解析法を提示している。即ち、翼面上非定常うず分布により非定常速度場を表示し、定常じょう乱の効果を検討した境界条件より積分方程式を得、これより振動の瞬間位置における非定常特性計算法を示している。

数値計算では、既存の実験結果との比較により解析法の精度を確認するとともに、非定常流体力、モーメントに対する無次元振動数、翼間振動位相差、また定常負荷の効果を一明らかにしている。

## 第5章 周期変動うず有り流れにあるタービン動翼列の共振特性

従来理論的に扱われることの少なかったタービン動翼列が周期変動流によって強制振動する場合について、第2、4章で提示された励振力、減衰力を求めるための解析法に基づいて考察している。ここでは二自由度質量ばね振動系を解析モデルとし、強制振動時の曲げねじり振動モードに関する連立方程式を得ている。

数値計算では、この連立方程式より求まる共振応答のうち共振振幅に着目し、これに対する翼形状や流入角などの定常特性の効果や、無次元振動数、動静翼列ピッチ比（翼間振動位相差）などの効果を明らかにしている。

## 第6章 三次元周期変動うず有り流れに対する平行壁間のタービン動翼列の動的応答

前章までは二次元流れを扱ってきたが、実際のタービン内部流れは複雑な三次元流れであることから、この三次元性がタービン動翼列の動的応答に及ぼす影響を解明するための解析法を提示している。ここでは三次元周期変動うず有り流れにある平行壁間のタービン動翼列を取上げ、その動的応答を考察している。三次元うず有り流れについての解析では、三成分のうず度の取扱いが重要であるが、従来の流線関数うず度による定式化では実際上計算が困難である。第6章ではその定式化に代り、非定常成分についての線形解法ではあるが、うず度を直接介することなく非定常うず有り速度を求め、問題を一つのポアソンの式へ帰着できる手法を用い解析を容易にしている。そして境界要素法を用いることにより翼面上非定常ポテンシャルに関する第二種フレドホルム型積分方程式を得ている。

数値計算では、圧縮機翼列とタービン翼列の動的応答の相違に着目しながら、それぞれの不均一な定常流れ場と周期変動流との干渉効果、非定常流体力の三次元パラメータによる変化、また二次流れの影響などを明らかにしている。

## 第7章 結 論

非粘性周期変動うず有り流れに対するタービン動翼列の動的応答の理論的及び実験的研究を行ない、また、曲げねじり振動するタービン動翼列の共振応答特性の理論的研究を行なった。そこでは  
1) 周期変動流のうず度と翼まわり定常じょう乱との干渉による周期変動流の変形を考慮した特異点法によるタービン動翼列の動的応答解析法を提示し、数値計算により非定常圧力分布、非定常流体力等の動、静翼列ピッチ比や流量係数による変化、また時間変動の特徴を一明らかにした。

ii) 上の解析法の予測精度の検証もあわせ、粘性後流をよぎるタービン動翼列の動的応答全般を二次元翼列風洞実験により明らかにし、非定常圧力分布、非定常流体力に関して解析結果と実験結果との良好な一致を得た。

更に強制振動問題に対して、

iii) 曲げねじり振動するタービン動翼列の非定常特性解析法を特異点法に基づき展開し、既存実験値との比較によりその有効性を確認するとともに、非定常流体力に関する数値資料を提供した。

iv) 1), iii) の解析法を用いて求めた励振力と減衰力に基づき、タービン動翼列翼の曲げねじり連成強制振動における共振応答解析を行ない、共振振動数及び共振振幅などの全般の特徴を数値資料により明らかにした。

以上の二次元流解析に加え、三次元性の影響を解明するために、

v) 平行壁間にあるタービン動翼列の三次元周期変動うず有り流れに対する動的応答解析法を、非定常うず有りじょう乱速度に関する新たな手法を導入し、更に境界要素法を用いて提示した。数値資料によってタービン翼列と圧縮機翼列の動的応答の著しい相違を指摘し、また非定常流体力等に対する三次元効果を明らかにした。

最後に臨み、終始懇切丁寧な御指導、御鞭撻を賜りました指導教官西山哲男教授に厚く感謝の意を表します。

また本研究に対し有益な御指導、御助言を賜りました東北大学工学部 大宮司久明教授、高速力学研究所 大場利三郎教授、小林陵二教授、ならびに機械工学専攻の諸先生方に深く感謝の意を表します。

実験には工学部助手貞広勝氏、学生篠原雅仁君、技官伊藤繕弘氏、板垣和夫氏、長田輝夫氏の多大な助力があったことを記し、ここに心より感謝の意を表します。

## 審 査 結 果 の 要 旨

ノズル翼列からの粘性後流をよぎるタービン動翼列の共振応答は、羽根の安全性確保の点から重視されてきたが、経験式への依存度が強く、不明の点が多く残されている。

本論文は、特異点法に基づく新しい解析法を展開して、うず度をもつ周期変動流れをよぎるタービン動翼列の動的応答及び共振特性を解析したもので、全文7章よりなる。

第1章では、ノズル翼列の粘性後流及びタービン動翼列の特徴を指摘し、圧縮機翼列に関する既存の動的応答解析法とは、全く異なった解析的立場を採用すべきであることを提言して、本研究の視点を明確にしている。

第2章では、周期変動うずあり流れが流入する動翼列について、うず度保存則を満たす非定常うずあり流れの翼面上うず分布による表示、積分方程式による決定、さらに動翼に作用する励振力などに関する解析法を提示している。動翼の定常負荷とうず度との非定常干渉効果を解明したことは、貴重な成果である。

第3章では、翼列風洞において、周期変動流れが誘発する動翼面上非定常圧力分布、励振力及び翼列下流の非定常全圧分布を測定し、第2章の解析結果と比較検討している。解析法の信頼性を実証すると共に、うず度の動的効果を強調している。

第4章では、一様流れにおいて、曲げ・振り連成の振動翼列について非定常うずなし流れの翼面上うず分布による表示、積分方程式の取扱いと動翼に働く減衰力の評価などに関する解析法を示している。動翼の定常負荷と振動変位との干渉による非定常成分の考慮に新しい工夫が見られる。

第5章では、第2、4章による励振力と減衰力を用いて、曲げ・振り連成の二自由度振動方程式から動翼の強制振動特性、特に共振応答特性解析を行っている。共振振幅と振り中心位置、ピッチ比、流入角、流量係数などとの関係を数値資料によって示し、有用な考察を展開している。

第6章では、平行壁間にまたがる動翼列へ周期変動うずあり流れが流入する時の三次元動的応答解析法を示している。翼列内部流路に分布する吹き出しのドリフト関数表示及び翼面上非定常ポテンシャルの境界要素法による決定などに創意が見られ、励振力と三次元パラメータの関係を明らかにしている。

第7章では、本研究を総括している。

以上要するに本論文は、タービン動翼列の周期変動うずあり流れに対する動的応答並びに曲げ・振り連成振動に対する共振特性に関して、新しい解析法を展開すると共に、いくつかの有用な知見を提供したもので、流体力学の進展に寄与する所が少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。