

氏 名	伊 藤 惇
授 与 学 位	工 学 博 士
学位授与年月日	昭和 59 年 1 月 11 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 2 項
最 終 学 歴	昭和 44 年 3 月 東北大学大学院工学研究科機械工学専攻 修士課程修了
学 位 論 文 題 目	部分空洞翼における空洞流れの線形解析模型と それに基づく特性解析法に関する研究
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 村井 等 東北大学教授 橋本 弘之

## 論 文 内 容 要 旨

### 1 研究の目的

部分空洞発生下のポンプや水車の羽根の設計や特性解析には、部分空洞二次元単独翼およびこれを基にして部分空洞二次元直線軸翼列の特性解析法を確立することが必要である。部分空洞プロペラでは、三次元性が強いことから直接ら施面上で三次元問題として取り扱うほうが有効である。全没形水中翼への直接的応用の他にこの種の羽根の三次元効果を知る上では部分空洞平面翼についての知見を得ることは意義があるものと考えられる。空洞の多くは翼前縁より発生するが、空洞が翼背面上の前縁より下流側で発生する場合も観測されており、特に厚翼ではこのようなことが多いことを考慮すると、結局、部分空洞翼の問題として以下の項目について取り扱う必要があるものと考えられる。すなわち、

- (I) 部分空洞二次元翼では、
- (1) 前縁より部分空洞が発生する薄翼より成る二次元直線軸翼列（前縁部分空洞翼列）
  - (2) 背面上の任意点より部分空洞が発生する厚翼より成る二次元直線軸翼列（背面部分空洞翼形）
  - (3) 前縁部分空洞二次元単独薄翼（前縁部分空洞翼形）
- (II) 部分空洞三次元翼では、
- (1) 前縁部分空洞平面翼（部分空洞平面翼）

- (1) 前縁部分空洞平面翼（部分空洞平面翼）
- (2) 前縁部分空洞プロペラ（部分空洞プロペラ）

部分空洞翼の流れは、空洞全体が翼背面上にあることから空洞特性や翼特性に及ぼす空洞流れの解析模型の影響は顕著であり、特性解析に採用すべき適切かつ合理的な空洞流れの解析模型は翼の迎え角や翼形形状のみならず空洞長さと共に変化し、さらに翼列では翼列配置によって影響を受ける。このようなことから部分空洞流れの解析模型の決定には至っておらず、したがって実測値を十分な精度で予測できる合理的な解析法は部分空洞二次元翼および三次元翼のいずれについても確立されていない。部分空洞翼は超空洞翼に比べよう乱が大きい、特に翼列あるいは単独翼の場合でも厚翼ではこの傾向が一層強く、従来の線形理論に基づく解析法では満足する精度を期待することはできない。翼背面上の前縁より下流側の任意点より部分空洞が発生する厚翼については、単独翼さえ既存理論はなく、また翼列に至っては、理論および実験的研究のいずれについても皆無である。このような背景の下に、本論文は部分空洞二次元翼および部分空洞三次元翼に関する前述の6項目についての特性解析法を提案する。

## 2 概 要

水力機械の羽根や船用プロペラのチップ側では一般に、翼厚は小さく、したがって前縁部分空洞翼列の解析法が必要であるが、翼列流れはじょう乱が大きいことから誘導速度の二次の項を省略する通常の薄翼理論にみられるような方法では、その結果の精度を著しく低下させることになる。このことから、前縁部分空洞翼列解析法では、基礎式においてじょう乱速度に関する非線形項は逐次近似法により考慮し、その他の二次の項もすべて考慮し精度を高める。

一方、羽根のボス側では翼厚は大きく、かつ翼列状態としては食違い角が大きく節弦比が小さい。このことから翼列干渉効果が極めて大きく高速下で作動する水力機械においては翼列干渉と部分空洞の相互関係を知ることは、特にこのような翼形、翼列状態においては必要不可欠のことである。以上のようなことから背面部分空洞翼列の解析法としては、高食違い角、低節弦比の場合にも破たんのないよう、翼形表面上に渦と吹き出しを分布させる方法を採用する。

空洞流れの解析模型は単独翼では任意に与えることができるので、実際の現象によく合致する解析模型を採用すればよい。しかし翼列の場合には任意の解析模型では運動量の保存が成立しなくなり、不合理性が生ずる。したがって運動量保存則を満足するような空洞の流れの解析模型を決定しこれを採用する。

以下に部分空洞翼列における解析手順を述べると、(1)部分空洞翼列の流れを渦と吹き出しで表示することにより誘導速度を求め、空洞部分における圧力一定条件と翼面上の接線流れの条件から連立積分方程式（1変数あるいは2変数の第一種フレードホルム型）が誘導される。(2)空洞吹き出し分布は級数展開し、かつこれにより任意の空洞後端厚みを与える半閉鎖形模型が導入される。翼面上の渦分布は、背面部分空洞翼列では、翼面上の小区間で一定値を仮定する渦層モデルを採用し、前縁部分空洞翼列では流れ場の特異性と収束性を考慮した級数に展開されている。(3)これらの積分方程式は吹き出し分布の級数の係数と各小区間の渦の強さあるいは渦分布の級数の係数を未知数と

する連立一次代数方程式に直され、決定された渦および吹き出し分布より、空洞特性および翼形特性を明らかにする。(4)以上の解法を前縁部分空洞翼列では平板翼形と欠円翼形の両者について、背面部分空洞翼列では軸流ポンプのハブ側の一翼列条件に対するCLARK Y 14%翼形について適用し、種々の特性を算出することにより翼列干渉と部分空洞との相関が明らかにされる。

部分空洞単独翼形では、上記の翼列の解析法に準ずるが、空洞の流れの線形解析模型として閉鎖形、半閉鎖形、開放形の三種を採用し特性解析し、前縁部分空洞欠円翼形の表面圧力分布の測定と高速度カメラによる観察の結果と、これらの解析法による計算結果との対比から空洞の流れの線形解析模型における空洞後端の特異性と後端厚みについて検討が行われる。

部分空洞三次元翼では、平面翼とプロペラについて誘導速度場から揚力面の積分方程式を誘導し、これに対する揚力線近似から、平面翼については空洞流れの線形解析模型とアスペクト比の影響を明らかにし、プロペラについては揚力面修正の導入の下に空洞特性、プロペラ特性を明らかにする。

### 3 各章の要約

第1章では緒言で、第9章は結言である。

第2章では、部分空洞翼列について誘導速度が求められ、単独翼形についてはこれらの特殊例として、さらにこれを三次元部分空洞翼に拡張して部分空洞平面翼および部分空洞プロペラの誘導速度が求められた。二種の境界条件から部分空洞翼の流れ場の基礎方程式として、渦分布と吹き出し分布に関する連立積分方程式が導かれた。空洞初生点の位置は、層流はく離点あるいは乱流への遷移点としその点における自由流線の方向について三種の条件式を提示した。

第3章では、空洞流れの線形解析模型として翼列では空洞後端に特意性のある半閉鎖形模型を導入し、運動量定理による揚力係数と圧力積分による揚力係数が一致する空洞後端厚みを決定し、単独翼形では半閉鎖形模型の他に閉鎖形模型および開放型模型を導入した。積分方程式の解法は、特異点分布を流れ場の特異性と収束性を考慮した級数に展開し、連立一次代数方程式に帰着させる級数解法である。

第4章では、二次元部分空洞単独翼の特性解析に採用すべき空洞の流れの解析模型を探究するために欠円翼形の表面圧力分布の測定と高速度カメラによる観察を行ったが、その結果空洞長さが弦長のほぼ30%以上では閉鎖形模型や開放形模型より半閉鎖形模型が適切であることが明らかにされ、さらにこの空洞後端厚みについて無次元数  $\delta / (\alpha_{\infty}^2 C)$  を提示し、これが迎え角に無関係に空洞長さに比例することが明らかにされた。

第5章では、部分空洞平面翼および部分空洞プロペラの揚力線近似に基づく解析法を提示したものであるが、部分空洞プロペラにおいて、アスペクト比が大なる仮定の下では空洞および翼厚を表す吹き出し分布の他翼によるものは二次の微小量となり、線形理論の範囲ではこれを無視できることを示し、このことから揚力線近似により部分空洞平面翼および部分空洞プロペラのいずれについても、翼幅方向各断面で二次元部空洞単独翼の流れとなっていることが示された。循環に関する積分方程式は、揚力と迎え角の非線形性を考慮した形で誘導され、またプロペラに対する揚力面修正の方法についても提示された。

第6章は特性を求める関係式を表示したものであるが、二次元翼では、空洞特性としてキャビテーション係数、空洞流線、空洞長さ、翼形特性として圧力分布、揚力係数、抗力係数、揚抗比、翼列ではさらに前後の轉向角、翼列干渉係数を求め、三次元翼では空洞特性としてキャビテーション係数、空洞発生領域、局所空洞体積、翼特性としては全揚力、全抗力、局所揚力・局所抗力の各係数、プロペラではこの他にトルク係数、スラスト係数などについての表示式が提示された。

第7章は具体的な数値計算を行いその結果を考察したものであるが、部分空洞翼列では翼列干渉と部分空洞の相互関係を明らかにし、部分空洞単独翼形については二次元翼列や三次元翼への拡張のための基礎としても重要であることから、既存解析結果と十分な対比を行いその妥当性の確認に努め、また部分空洞三次元翼では三次元効果と部分空洞の相互関係を明らかにした。

第8章は、本解析法により得られた空洞特性および翼特性を種々の実験結果と対比し、本解析の妥当性を検討したものであるが、前縁部分空洞翼列については、両者は傾向的に良く一致しており、その値にも大きな差は認められない。部分空洞単独翼形については、実験から求めた無次元空洞後端厚みに基づく解析結果は、形状の異なる部分空洞翼形に対しても実験値と良好な一致を示すことが明らかにされた。部分空洞三次元翼については、部分空洞平面翼および部分空洞プロペラのいずれについても傾向的に良い一致を示した。

## 審査結果の要旨

ポンプ、水車及び船用プロペラなどの高速化に伴い、部分空洞の発生は回避できない状況にある。このため、高速作動下における流体機械の特性評価や性能改善の見地から、羽根要素である直線翼列やプロペラ羽根などの部分空洞発生下における特性解析法の確立への要請が強くなっている。

本論文は、解析の基礎となる部分空洞流れの線形解析モデルを導入し、これに基づく二次元翼及び三次元翼の系統的な特性解析法を提示したもので、全文9章より成る。

第1章は、緒論で既存研究を概観し、本研究の目的を述べている。

第2章では、うずと吹出しの特異点分布により部分空洞二次元薄翼、厚翼及び三次元薄翼の流れを表示し、境界条件から特異分布に関する連立積分方程式を導いている。

第3章では、単独翼には閉鎖、半閉鎖及び開放の三種の流れモデルを導入し、吹出し分布のモード関数表示との関係を明らかにしている。また、翼列には、運動量保存則に基づく半閉鎖モデルの決定と逐次近似による非線形項の処理法を述べている。

第4章では、欠円翼形の部分空洞流れの観察と圧力分布測定結果に基づいて、特性計算値との比較から半閉鎖モデルが最適であること及びその空洞後端厚みの無次元値は迎角とは無関係、空洞長さとは直線関係にあることなどを見出し、これらの成果は高く評価される。

第5章では、部分空洞平面翼及びプロペラ羽根について揚力線近似の導入により、翼素位置における二次元性の成立を指摘し、循環に関する単一積分方程式の解法を展開している。

第6章では、特異点分布から二次元翼及び三次元翼の部分空洞特性及び翼特性表示の関係式を示している。

第7章では、数値結果から部分空洞流れにおける解析モデルと翼特性、翼列特性と翼列干渉、アスペクト比による三次元効果などを論じており、これらは貴重な設計資料である。

第8章では、第4章の無次元空洞後端厚みをもつ半閉鎖モデルに基づく特性計算値を、二次元翼及び三次元翼に関する既存実験値と比較検討し、解析法の妥当性の検証を行っている。

第9章は結論である。

以上要するに、本論文は部分空洞翼について導入した空洞流れの線形解析モデルの実験的検証を行うと共に二次元翼及び三次元翼について特異点法に基づく統一的な特性解析法を提示して、高速流体機械の設計に有用な知見を与えたもので、流体力学の発展に寄与するところが少なくない。

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。