

氏名	Li Shou Ren 李 受 人
授与学位	博士 (工学)
学位授与年月日	平成 11 年 7 月 14 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 4 条第 2 項
最終学歴	昭和 63 年 7 月 武漢水運工程学院 大学院工程機械系修士課程修了
学位論文題目	遠心ポンプの激しいキャビテーション壊食と その予測に関する研究
論文審査委員	主査 東北大学教授 井小萩 利明 東北大学教授 林 叡 東北大学教授 上條 謙二郎 東北大学助教授 祖山 均

## 論 文 内 容 要 旨

### 第 1 章 結 論

流体機械の小形・高速化とともに、キャビテーションによる性能劣化、振動、壊食、特に、壊食率が従来のもより 1~2 桁以上も高く、短時間で機械に致命的損傷を与える激しい壊食は重大な問題となっている。ポンプなどにおいては、この激しい壊食の発達過程をいかに正確に、かつ、定量的に予測するかが緊急な課題とされている。そもそも、キャビテーションは、壊食性が著しく異なる各種の発生形態によって多元的に構成されているので、「流体機械のいかなる作動条件下で、いかなる発生形態のキャビテーションにより、どのような範囲に激しい壊食が生じ、また、その壊食率はどの程度か」などの解明がまず必要となる。

遠心ポンプに対しては、これまでも実機におけるキャビテーション強さの推定や壊食量の予測が試みられてきたが、予測値と実測値の間にはしばしば大差が生じており、定量的予測法が確立されているとは言い難い。このような予測値と実測値の差異の原因としては、作動条件の正確な把握やキャビテーションの発生形態などの特定が十分なされていないことによると考えられる。

そこで本研究では、遠心ポンプに生じる激しい壊食を伴うキャビテーションの発生や発達機構を解明するとともに、その予測法の確立を目指して、キャビテーションの発生形態を特定し、振動加速度や騒音などによる間接的評価や、キャビテーション壊食の直接測定による定量的評価など、多方面からの探求を試み、これらの全体像を十分に把握することを目的とした。

### 第 2 章 遠心ポンプに生じる激しい壊食性キャビテーションの高速写真観察

本章では、種々のポンプ作動条件下における激しい壊食を伴うキャビテーションの様相の解明を目的として、比速度  $N_s = 300$  ( $m, m^3/min, rpm$ ) の遠心ポンプを取り上げ、激しい壊食が生じる作動条件、特に低流量域を中心にキャビテーションの様相を高速ビデオカメラなどで系統的に観察するとともに、設計流量点付近の高流量域の観察結果との比較も行い、壊食に寄与している渦キャビテーションの挙動を解明して、次のよ

うな結果を得た。

(1) 低流量域では、図 1 に示したように、羽根前縁近傍の逆流域に渦キャビテーションが発達し、この渦キャビテーションが後続の羽根前縁により正圧面側と負圧面側に二分断されて高壊食性の渦キャビテーションに発達する。

(2) 低流量域における流れパターンは、流量比  $Q/Q_d$  を変えても類似しているが、 $Q/Q_d = 60\%$  の時の渦キャビテーション塊の方が、 $Q/Q_d = 40\%$  の場合のそれより大きく発達しており、キャビテーションによる壊食の危険性が高い。

(3) 壊食面の様相および流れパターンは、 $Q/Q_d \geq 80\%$  の設計流量点付近では  $Q/Q_d \leq 60\%$  の低流量域と明らかに異なり、設計流量点に近づくほどキャビテーション塊の厚さは薄くなり、流れがより安定になっている。

Rotating direction

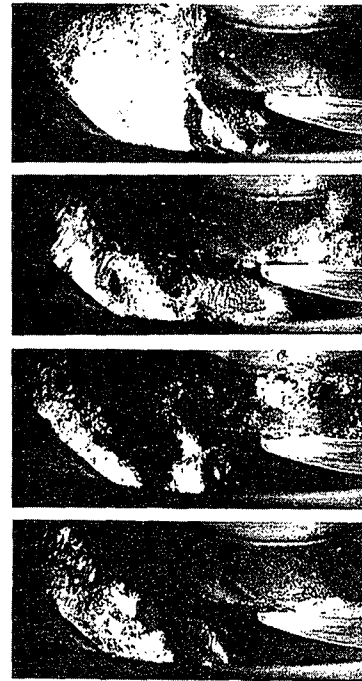


図 1 羽根前縁近傍の渦キャビテーションの様相  
( $Q/Q_d = 60\%$ 、 $NPSH = 2.1\text{m}$ )

### 第 3 章 遠心ポンプに生じる激しい壊食挙動の振動とノイズによる解明

本章では、激しい壊食を引き起こすキャビテーション強さの解明を目的として、第 2 章と同様の遠心ポンプに生じる壊食性渦キャビテーションに起因する高周波振動とノイズを、振動加速度計、AE センサおよびヒドロホンを用いて、種々の作動条件下において系統的に調べ、次のような結果を得た。

(1) 小流量比、小 NPSH (有効吸込ヘッド) の領域において、振動加速度および AE センサによる音響パワーが著しく増大する。すなわち、「この領域においてキャビテーション強さが増大し、激しい壊食が起こる」と言える。図 2 には、本研究で初めて求められた振動加速度の強さ  $I_{Acc}$  の等値線図を示す。

(2) ポンプのケーシング壁で測った高周波振動加速度を波高分析することにより、キャビテーション強さが十分大きい激しい壊食の発生領域を比較的容易に特定し得る。

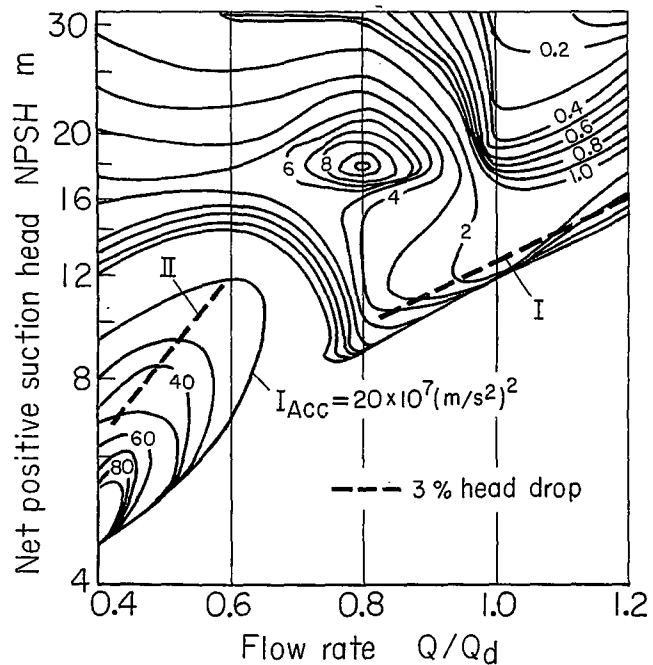


図 2 振動加速度の強さ  $I_{Acc}$  の等値線図

#### 第4章 遠心ポンプにおける激しい壊食の発達過程

本章では、第3章で測定した振動加速度の強さ分布を基にして、激しい壊食が生じる可能性が特に高い作動条件下においてキャビテーション壊食試験を系統的に行い、種々のタイプの激しい壊食が羽根車の各所に発生する事実を明らかにし、さらに、壊食率および体積欠損率などを系統的に調べ、それらの発達過程の詳細を明らかにした。得たる結果を要約すれば、

(1) 遠心ポンプに生じる激しい壊食の領域は、図3に示したように、作動条件により羽根正圧面③、④、負圧面①、主板上②のように大いに異なる。

(2) 壊食率は、設計流量域よりも流れの不安定な低流量域で大きく（特に  $Q/Q_d=60\%$  では壊食率は極大となる）、「激しい壊食と低流量不安定流れとの間には強い相関がある」と言える。

(3) 壊食深さと壊食領域の経時変化は必ずしも同一の挙動を示さない。すなわち、最大壊食深さは定常期から減衰期へ移行していても、体積欠損率が直線的に増加し、壊食領域は拡大し得る。

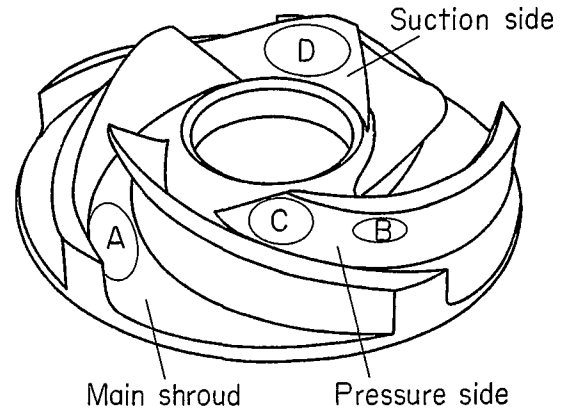


図3 羽根車内の壊食領域

#### 第5章 遠心ポンプに生じる激しい壊食の壊食率の推定法

引き続き本章では、遠心ポンプに生じる激しい壊食の推定法を探求するために、初期壊食状態の壊食面の観察からの壊食率の予測、振動加速度などの間接的なキャビテーション強さからの壊食率の予測、あるいは、最大壊食の位置関係からの壊食率の予測などを試み、次のような結果を得た。

(1) 基準壊食面の壊食の程度と、問題の壊食面のそれとを比較することによる壊食率の推定法（基準壊食面法）を提案し、その有効性を検証した。

(2) キャビテーションによる高周波パルスの振動加速度の強さ  $I_{ACC}$  または実効値  $I_a$  と、壊食率  $\dot{E}_{max}$  および体積欠損率  $\dot{\Delta V}$  との関係を提案した。図4には、一例として、本研究で得られた  $I_{ACC}$  と  $\dot{E}_{max}$  の関係を示す。これにより、任意の条件下で振動加速度を測定することにより  $I_{ACC}$  または  $I_a$  が求ま

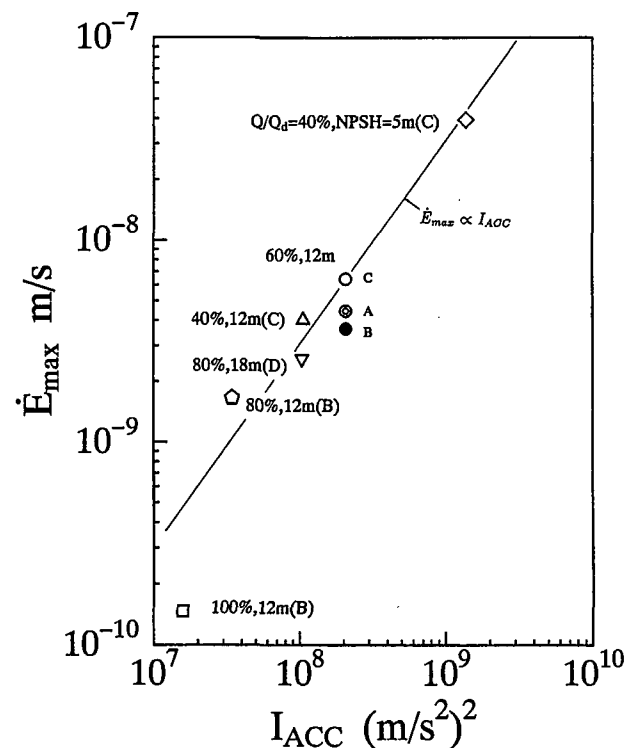


図4 振動加速度の強さ  $I_{ACC}$  と壊食率  $\dot{E}_{max}$  の関係

れば、壊食率および体積欠損率を簡便に推定できる。

(3) 主板上と羽根正圧面の壊食位置に近いほど壊食率は高くなるが、これは主として低流量域で顕著である。

## 第6章 給気あるいは脱気による遠心ポンプの性能改善

遠心ポンプの性能改善あるいはキャビテーション壊食防止のために、ポンプ羽根車内における給気あるいは脱気の積極的な利用が考えられる。スラリー遠心ポンプには、羽根まわりの大量の空気を脱気する真空ポンプを付設しているものがあり、羽根車中心部に集まる空気量に対する調節機能が優れている。例えば、この機能を利用すれば、都市洪水が予想される直前から開始する排水ポンプの運転の際に、エネルギー節減のために流量と軸動力をできるだけ小さく保つ低流量・低負荷運転が期待できる。

よって本章では、この種のスラリー遠心ポンプを取り上げ、種々の真空ポンプの弁開度、吸込管長、給気流路について、気泡塊の挙動を詳細に観察するとともに、ポンプの低流量・低負荷特性を明らかにした。さらに、このような特性を活用し、都市洪水のような緊急時の排水ポンプの設計指針を提示するとともに、次のような結果を得た。

(1) 遠心ポンプの軸動力は、真空ポンプの弁開度をⅠ（最大脱気状態）からⅢ（最大給気状態）に変えることによって、著しく軽減できる。これにより、大気中の空気が真空ポンプ中に入り、主羽根車の中央部に集積する空気量を増加させ、その結果、羽根車の負荷が減少する。しかしながら、開度Ⅰの場合は、効率と揚程が開度Ⅲの場合よりも高いので、緊急排水時や壊食防止の観点からは開度Ⅲから脱気運転状態の開度Ⅰに切り替えることが望ましい。

(2) 軸動力軽減のための給気法としては、主板上から羽根車背後への直接給気が吸込管壁からの給気よりもはるかに有効である。

## 第7章 結 論

各章で得られた結果をまとめて結論とした。

## 審査結果の要旨

機械、土木、化学、原子力などの工業分野において、種々の環境と作動条件下で幅広く使用されるポンプの信頼性向上が強く要請されている。特に、ポンプの小形・高速化に伴い、キャビテーションによる性能劣化、振動、壊食が顕在化することが知られており、40,000 時間の運転保障が求められつつある。とりわけ、壊食率が従来よりも1~2桁も高く、短時間でポンプに致命的な損傷を与える激しい壊食は信頼性向上を阻む重大な問題となっている。本論文は、遠心ポンプに生ずる壊食性キャビテーションの発生形態と激しい壊食の発達過程を実験的に究明し、振動加速度などのモニタリングによる壊食の予測法およびその軽減法について検討を行った結果をまとめたもので、全編7章よりなる。

第1章は緒論である。

第2章では、比速度  $N_s=300(\text{m}, \text{m}^3/\text{min}, \text{rpm})$  の三次元羽根車を有する遠心ポンプを取り上げ、羽根車内に生ずるキャビテーションの様相を高速度ビデオカメラ等で詳細に観察した。流量比が60%前後の低流量域で前縁から周期的に発達する渦キャビテーションが激しい壊食をもたらす危険性が高いことを明らかにしている。これは興味ある知見である。

第3章では、壊食性キャビテーションに起因する遠心ポンプの高周波振動および音響ノイズを加速度振動計などを用いて種々の作動条件下において系統的に調べ、それらの音響パワーや周波数スペクトラムを流量比、有効吸込ヘッドに対して明らかにした。さらに、振動加速度強さに関する等値線図を作成し、激しい壊食の予想される作動条件を特定している。これは壊食予測の上で有用な成果である。

第4章では、特に激しい壊食が生ずる可能性が高い作動条件下において実際に壊食試験を行い、羽根車の正圧面、負圧面、主板上の各所に生ずる壊食の発達過程を調べている。それらの壊食曲線を基に、低流量域での渦キャビテーションの不安定挙動と強い相関があることを実証している。

第5章では、初期壊食状態から激しい壊食の壊食率を推定する簡便な基準壊食面法を提案し、壊食試験データと比較することにより、その有効性を検証している。また、遠心ポンプの種々の作動条件下における振動加速度強さと壊食率あるいは体積欠損率との間には、作動条件によらずほぼ両対数上で直線関係があることを見出ししている。これらの知見は、初期壊食面の観測あるいは振動加速度のモニタリングによって任意の作動条件下での壊食量を推定できることを示しており、極めて有用な成果である。

第6章では、ポンプの性能改善あるいは壊食防止の観点から、羽根車内の空気を脱気できる真空ポンプを付設したスラリー遠心ポンプを取り上げ、種々の脱気あるいは給気運転下での低流量・低負荷特性を明らかにした。また、都市洪水時の緊急排水運転や壊食防止運転の際には、給気運転から脱気運転に切り替えることが有効であることを推奨している。

第7章は結論である。

以上要するに本論文は、遠心ポンプの信頼性の向上を目指して、低流量域における渦キャビテーションと激しい壊食の発達過程との関連を詳細に解明し、モニタリングなどによる激しい壊食の予測法を確立したもので、流体力学ならびに流体機械学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。