

氏 名	かわもと かずとし 川 本 一 俊
授 与 学 位	博 士 (工 学)
学位授与年月日	平成 5 年 5 月 12 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 37 年 3 月 大阪府立大学工学部機械工学科卒業
学位論文題目	800m 級高落差ポンプ水車ランナの実用化に関する研究
論文審査委員	東北大学教授 長南 征二 東北大学教授 大場利三郎 東北大学教授 橋本 弘之 東北大学教授 谷 順二

論 文 内 容 要 旨

第 1 章 緒 論

ポンプ水車の高落差化は、揚水発電所の開発可能地点の拡大と建設費低減に有効であり、国土の狭い我が国では特に必然的な方向と言えよう。そして、近年、従来の500m級を大幅に超える800m級のポンプ水車の計画が正に進められている。しかしながら、高落差化を計るためには、まず、ポンプ水車の心臓部であるランナの振動強度の問題を十分に解明して信頼性を確認しておくことが必要不可欠である。このように、ポンプ水車の高落差化に伴う問題点は、ランナへの遠心力と加振力の増大による応力の増大、加振周波数とランナ固有振動数の接近による共振の問題、および、ランナ出口の旋回エネルギーの増大による吸出し管内の渦振動の増大、などである。そこで、本論文では、ポンプ水車の高落差化に関連して次の一連の研究を行った。

- (1) ガイドベーン高さの増大による加振力低減の可能性の確認と、応力低減のためのランナ羽根厚さ増加が水力性能へ与える影響度の把握、
- (2) ランナの水中振動の基礎的挙動とこれに与える諸因子の影響とを検討するための、ランナと上カバーを単純な 2 円板に模擬した理論的、実験的研究、
- (3) ランナの水中振動挙動の有限要素法による解析、
- (4) 実落差模型試験によるポンプ水車ランナの水中固有振動数と実働応力の確認と、その制御方法の研究、
- (5) 模型水車の試験による吸出し管内の渦振動の抑制方法の研究、など。

第2章 ランナ変動応力の低減法の探求

ポンプ水車ランナの変動応力は、主にガイドベーンとランナ羽根との干渉によって生じることが知られている。この干渉作用を弱めるためには、ガイドベーンとランナ羽根との距離を離すことが有効であることは明らかである。よって、本研究では、ガイドベーンの高さを高くすればガイドベーンとランナ羽根との流線上での距離を遠ざけることができるとの着想により、従来よりもガイドベーンを43%高く設計した模型ポンプ水車を実験して、図1に示すようにランナまわりの圧力変動が30%~40%低減することを確認した。また、これによって、ポンプ水車の水力性能は低下しないことも確認した。

同じ加振力が作用する時のランナの変動応力は、ランナ羽根の肉厚を厚くすることによって低減できる。作用面側のプロフィールが同じでベーン肉厚だけを5%厚くした模型ポンプ水車の実験によって、図2と図3の結果を得た。これによって、ポンプ水車の水力性能を低下させることなく、ランナ羽根の変動応力を相当程度低減できることが確認された。

第3章 ランナと上カバーとの連成振動の基本特性の解明

ポンプ水車のランナは、上カバーと下カバーとで囲まれた水で満たされた狭い空間で回転するので、その振動挙動は流体を介したまわりのカバーとの間の複雑な連成振動になる。この連成振動の基本的性質を把握するために、ランナと上カバーとを、流体を満たした円筒容器内で対向する単純な2円板に置き換えて連成振動方程式を導いた。これを解くことによって、2円板の連成振動には同相と逆相の二つのモードがあり、逆相振動の固有振動数の水中での低下率は大きく、同相振動のそれは小さいことを示した。また、図4と図5に示すように、上カバー厚さと流体層厚さのランナの水中固有振動数に与える影響度を試算した。さらに、実験によりこれを検証し、この2円板の実際の水中固有振動数を精度良く計算できる実験式を導いた。

第4章 ランナの振動挙動の有限要素法解析

前章の単純円板に対して実際のポンプ水車ランナは、複数の羽根を含んだ複雑な形状をしている。この水中振動の挙動を汎用連成振動解析コードを使用し解析することを試み、図6、図7に示す結果を得た。すなわち、ランナのクラウンおよびシュラウドの振動は、ランナ羽根に拘束されて羽根間の外周近くに限定され、水中固有振動数は空中固有振動数に対して1次は約50%に、2次は約60%に低下する。7枚羽根ランナの1直径節振動は6枚羽根ランナの2直径節振動に比べて共振しにくい。

また、空中固有振動数に与えるランナ厚さの影響について解析し、7枚羽根ランナの1直径節振動にはクラウンの主軸付け根近くの剛性が強く影響し、6枚羽根ランナの2直径節振動にはクラウンとシュラウドの厚さが強く影響することを明らかにした。

第5章 実落差模型試験によるランナの実働応力の確認

ランナとまわりの流体との連成振動まで相似条件が成立ち、実物ランナの実働応力そのものを測

定できる実落差模型試験を実施して、ランナ内の変動応力の最大値は羽根外周先端のクラウンとシュラウド付け根のすみ肉部に生じることを確かめ、次の結果を得た。

図8：水車運転中の変動応力はポンプ運転中のそれよりも大きい。

図9：7枚羽根ランナの共振時における変動応力は6枚羽根ランナのそれよりも小さい。

図10：クラウンとシュラウドの肉厚と背圧室、側圧室の広さがランナ水中固有振動数に与える影響度を算定できる資料を得た。

第6章 吸出し管内の渦振動の給気とフィンによる抑制

固定翼水車の古くからある問題に、吸出し管内のランナからの旋回流による渦振動の問題がある。高落差化に伴いこの渦運動のエネルギーも大きくなるが、これを抑制するために、吸出し管内に空気を供給する方法と吸出し管内壁にフィンを取り付ける方法について、模型水車を使用して実験して図11、図12に示す結果を得た。すなわち、給気の効果は渦キャビテーションが未発達な高 σ の領域では効かないこと、フィンの効果は低周波成分には顕著であるが高周波成分を増加させること、および、水圧脈動の高周波成分と騒音とは少量の給気で効果的に抑制できること、などを明らかにした。

第7章 結 論

800m級ポンプ水車ランナの実用化に関して以下のことが解明された。

すなわち、

- (1) ガイドベーン高さを高くすることがランナの振動を低減するのに有効であることを確認した。
- (2) ランナ羽根の変動応力を低減するために羽根厚さを厚くした時の水力性能への影響度を確認した。
- (3) 解析によりランナの水中連成振動現象を解明した。
- (4) ランナの水中固有振動数はランナと上カバーの間隔とランナ肉厚で有効に制御できることを明らかにし、その影響度を予測できる図表を得た。
- (5) 少量の給気によって、吸出し管側の高周波振動と騒音を抑制できる。

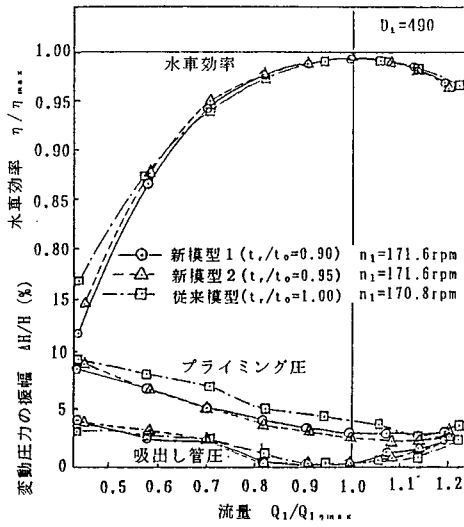


図1 水車運転時特性へのガイドベーン高さの影響

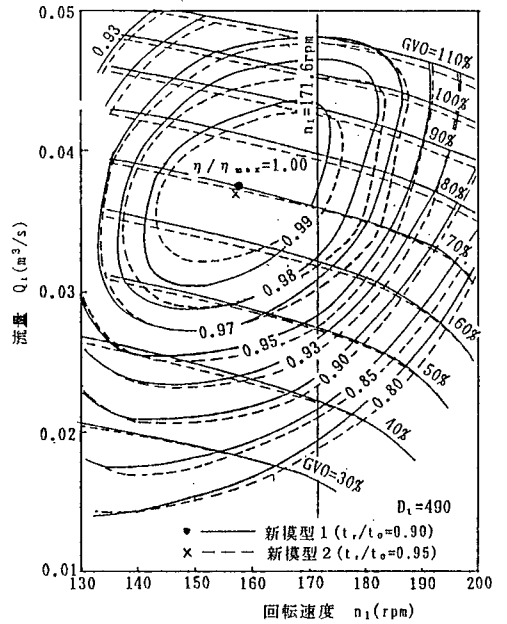


図2 新模型ポンプ水車の等効率曲線

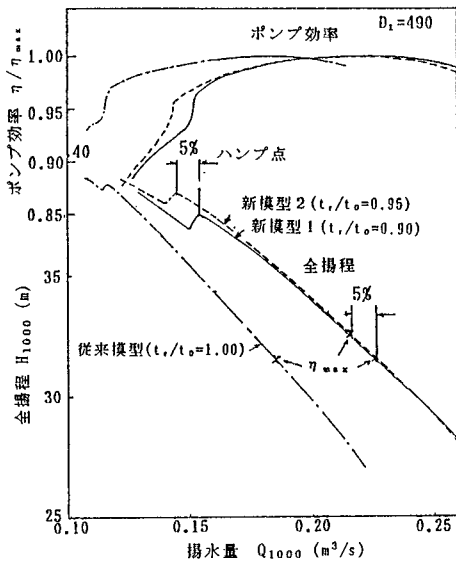


図3 ポンプ運転時の新模型と従来模型の特性比較

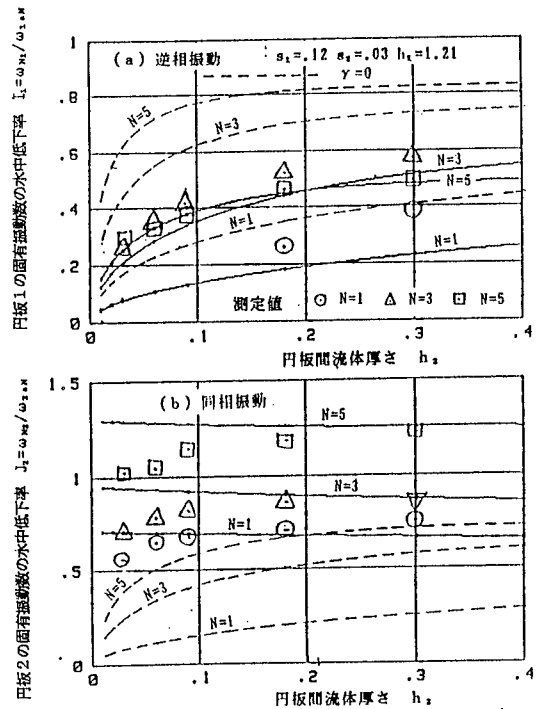


図4 2円板連成振動数の理論値と実験値の比較 (2円板間距離と水中低下率の関係)

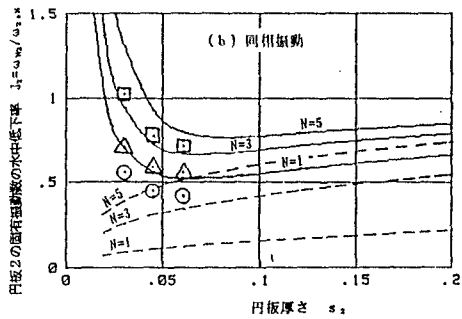
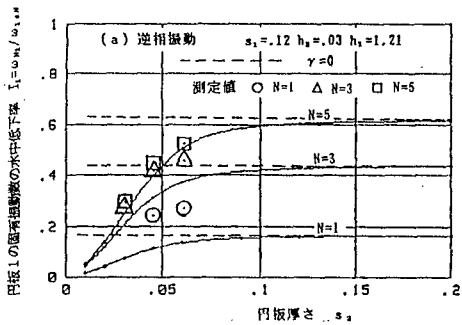
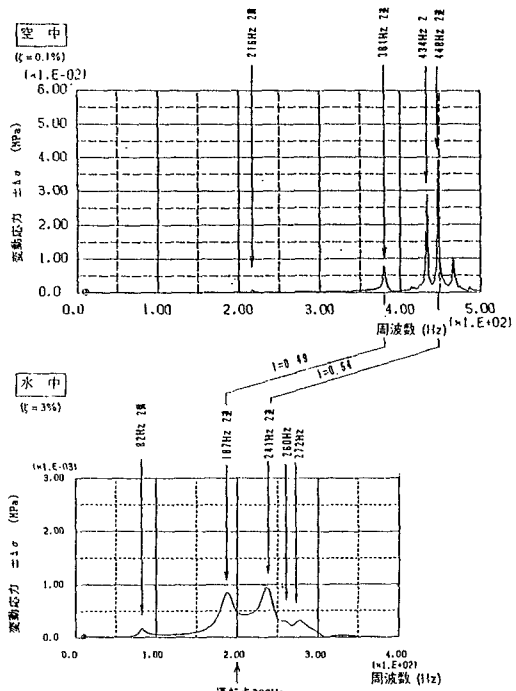


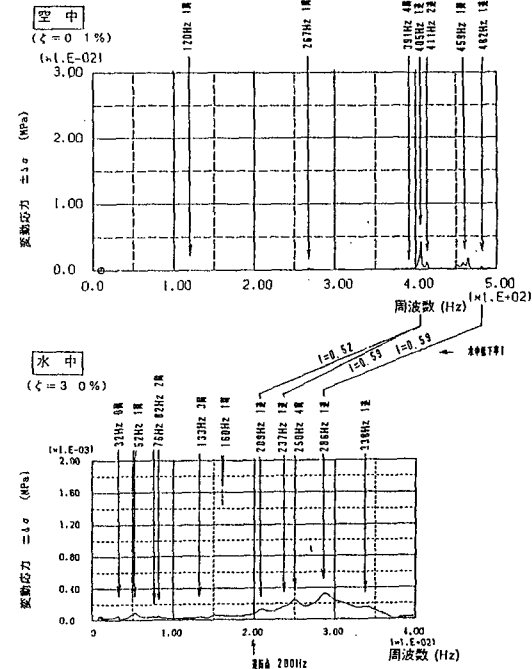
図5 2円板連成振動数の理論値と実験値の比較 (上カバーの板厚と水中低下率の関係)



N = 600rpm系 Zr = 6
羽根1ピッチ間加振力 F = 1.0 N/点

クラウン削羽根応力
2 直経筋連相加振

図6 空中と水中の周波数特性比較 (600rpm機6枚羽根ランナ)

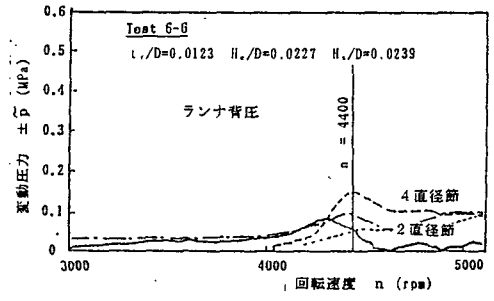
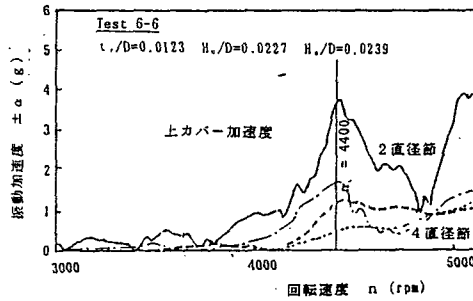
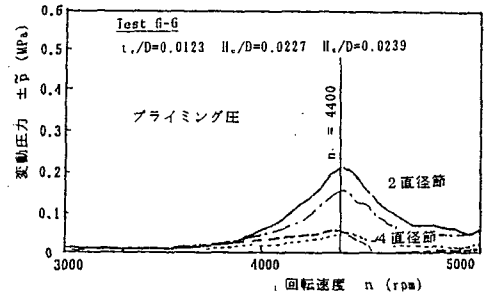
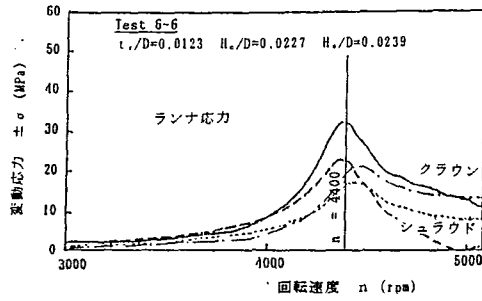


N = 600rpm系 Zr = 7
羽根1ピッチ間加振力 F = 0.857 N/点

クラウン削羽根応力

1 直経筋連相加振

図7 空中と水中の周波数特性比較 (600rpm機7枚羽根ランナ)



2 直径節: 3n2r成分 / 4 直径節: 4n2r成分

— 水車運転
 - - - ポンプ運転

図8 水車運転時とポンプ運転時の振動比較

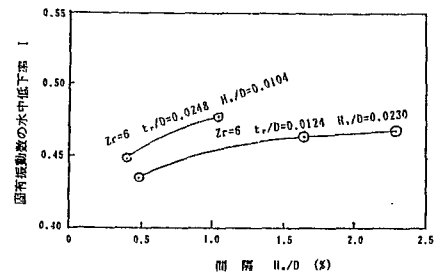
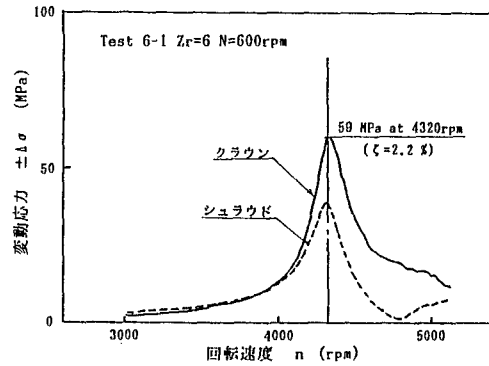


図 5.15.1 ランナと上カバーとの間隔の影響

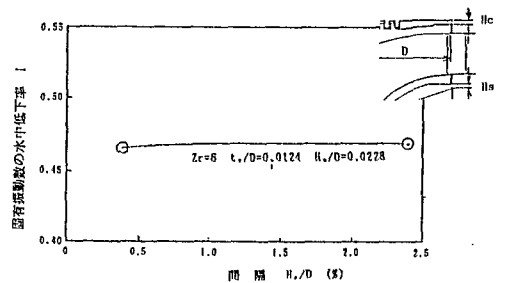
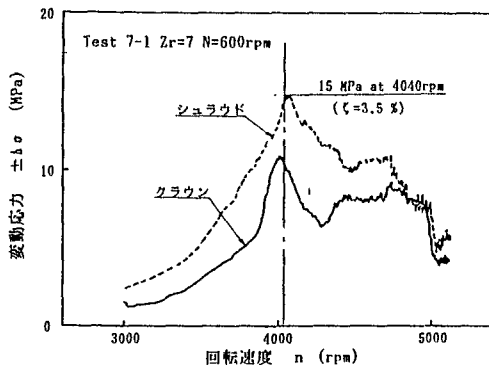


図9 6枚羽根と7枚羽根のランナ変動応力比較

図10 ランナと下カバーとの間隔の影響

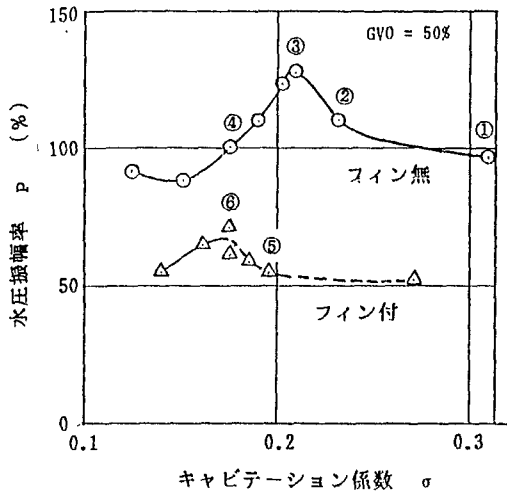


図11 キャビテーション係数と水圧振幅

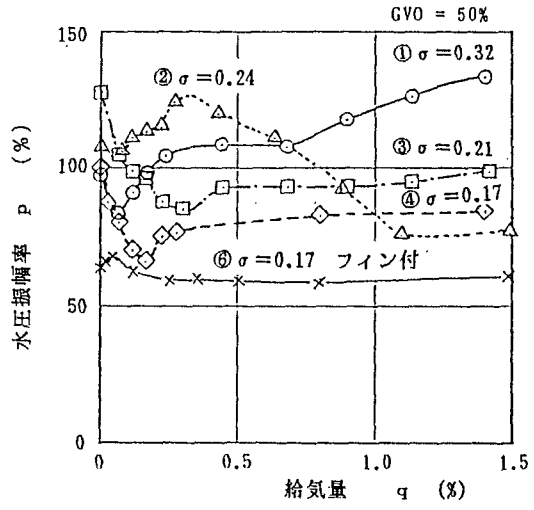


図12 給気量qと水圧振幅p

審査結果の要旨

ポンプ水車の高落差化は揚水発電所の建設可能地点の拡大と建設費低減に有効であるが、これを実現するためには心臓部であるランナの耐振問題を正しく評価し、その信頼性を向上させることが必要である。

本論文は、ポンプ水車の高落差化に伴って生ずるランナ応力の増大、流れによる加振周波数とランナ固有振動数との接近による共振の発生、さらにはランナ出口の旋回エネルギーの増大による吸出し管内の渦振動の増大などを理論的ならびに実験的に解析し、その結果得られた知見をもとに800m級ポンプ水車実現のための諸方策を具体的に提案したもので、全編7章よりなる。

第1章は緒論である。

第2章では、従来よりもガイドベーンを高くすればランナの加振力を低減できることを予測し模型実験によりこれを確認するとともに、従来よりもランナ羽根を厚くした時の水力性能の変化を実験的に明らかにしている。これらは実用的に重要な知見である。

第3章では、ポンプ水車ランナと上カバーとの連成振動を円筒容器内で対向する2円板に置き換えて、連成振動方程式を導いた。さらに、この方程式によって、ランナの連成振動の基本特性を明らかにし、上カバー厚さと流体層厚さがランナの水中固有振動数に与える影響を定量的に示している。

第4章では、6枚羽根と7枚羽根のランナの振動特性を有限要素法で解析し、空中での固有振動数を制御する設計方法を考案している。また、それぞれのランナの水中での振動特性の特徴を明らかにし、空中固有振動数の水中低下率を具体的に求めている。

第5章では、流体構造連成振動の相似則を考慮した実落差模型試験を実施して、新設計ランナが実働状態で高い信頼性が得られることを確認している。また、前章までの理論計算によって得られたランナ内の変動応力の最大値の発生部位、水車運転中とポンプ運転中の変動応力の割合、7枚羽根ランナと6枚羽根ランナの共振時における変動応力の比較などについて確認し、ランナの肉厚および周囲の流体厚さがランナの水中固有振動数に与える影響を具体的に予測できることを示している。これらは、今後の高落差ポンプ水車設計手法の指針となる重要な成果である。

第6章では、吸出し管内の渦振動を抑制するために吸出し管内に空気を供給する方法と吸出し管内壁にフィンを取り付ける方法との効果について模型水車を使用して実験的に明らかにし、高落差ポンプ水車では少量の給気で水圧脈動の高周波成分と騒音とを効果的に抑制できることを明らかにしている。

第7章は結論である。

以上要するに本論文は、ポンプ水車ランナの信頼性向上について理論的検討と実験的確認を行ったものである。得られた成果は高落差揚水発電所の実現に大きく貢献するものであり、流体機械工学および構造振動工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。