

氏 名	奈良坂 力
授与学位	博士（工学）
学位授与年月日	平成4年7月8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22年3月 宮城県工業学校機械科卒業
学位論文題目	高比速度カプラン水車用適列薄翼形のキャビテーションに関する実験的研究
論文審査委員	東北大学教授 大場利三郎 東北大学教授 小林 陵二 東北大学教授 太田 照和 東北大学助教授 庵原 昭夫

論 文 内 容 要 旨

第1章 緒 論

近年、世界的には未だ多くの未開発水力地点を残している大河川（大流量・比較的低落差）の開発が、環境問題の観点からも強く要請されているが、これに応えるための高比速度カプラン水車の研究はそれほど推進されていない。また、昨今、「同一の供試模型，流速およびキャビテーション係数の下でも，キャビテーションの様相は試験水槽によって大いに異なる」とするジョンソン効果が見いだされ，キャビテーションに関する既存研究の見直しが求められ，少なくとも，翼形または翼列のキャビテーションの研究に際しては，それらの決定的支配因子であるキャビテーションまたはキャビテーション核（以下単に核という）の様相の明示が求められている。

よって，本論文では，まず，高信頼性の翼形試験法を確立し，次いで，ここに得られた知見を踏まえて，高比速度カプラン水車用の薄い低抗力適列翼形の探究を試みる。

まず，ジョンソン効果の観点から，試験水槽の測定部に翼形有り，無しの場合について核の経時変化を詳細に調べた。また，翼形まわりのキャビテーションを高速写真観察し，以上の結果を踏まえて，高比速度カプラン水車用の薄い翼形二種のキャビテーション性能試験を行い，十分低抗力で，広いキャビテーション係数の範囲で性能が変化しない適列翼形を見い出した。また，このような薄い翼形による適列翼形の性能は，微小前縁形状差によって，著しく変化するなどの興味ある事実を見い出した。

第2章 回流試験水槽と核分布

ジョンソン効果の観点から、今後のキャビテーション研究あるいは既存研究の見直しに際しては、試験水槽内の核の詳細な知見は不可欠と言える。よって、高精度の翼形キャビテーション試験法の確立を目途として、回流式翼形試験水槽(図1)の測定部に翼形(Clark Y 4%)が“有り”(そこに気泡が発生する)、“無し”の二つの場合について、核分布の経時変化およびキャビテーションの様相を調べてみた。

まず、主要なキャビテータである翼形が無くても、ポンプその他のキャビテータも考えられるし、また、水槽壁面の境界層による気泡増殖効果なども知られているので、“翼形無し”の場合の核分布の経時変化を調べた結果を図2に示した。

この試験水槽の核分布は、幸いにして、一定の待ち時間の後には、経過時間 t に無関係に一定になることが見て取れる。したがって、本試験水槽においては、ポンプ等のキャビテータあるいは壁面境界層による核増殖効果は無視し得る程度に止まっていると言える。

Clark Y 翼形が有る場合の初生近傍では(図3)、上記の“翼形無し”の場合のそれと同様に、「一定の待ち時間の後には、核分布が t に無関係に一定となる」事実が注目される。なぜなら、この事実は「この試験水槽によれば、核分布が一定の理想的な初生キャビテーションあるいは微小キャビテーション Limited Cavitation の実験が可能である」ことを明示しているからである。

第3章 翼形まわりのキャビテーションの高速写真観察

キャビテーション気泡(以下単に気泡という)は、一般に独自の様相、生因、障害性、消滅キャビテーション係数 σ_c および発達領域を持つ各種のものにより多元的に構成されている(ジョンソン効果の一側面と言える)から、翼形のキャビテーション性能に関する研究が果たしてどの種類のキャビテーションに対するものか、さらには、これらが定常性のものか否かなどに注目し、気泡の瞬間写真観察を試みた。

図4には、 $\alpha = 3^\circ$ の場合のサブキャビテーション(以下Sub. Cという)領域の翼形キャビテーションの様相の瞬間写真を示す。遷移領域に近い $\sigma = 1.11$ では、スパン方向の一部(位置および広がりとは時間とともにランダム変化)に、スポット気泡の脱落(下記の遷移領域における大脱落の一種とみられる)が認められ、この下流に渦キャビテーションが多数の微小気泡または気泡雲を伴って発生する。次に、遷移領域に対応する、 $\sigma = 0.93$ および 0.75 の写真を見ると、まず、スパンのほぼ全域にわたるスポット気泡の大群の翼弦中央からの大脱落(以下気泡大脱落という)が目につく。最後に、 σ とともに Ca が変化するスーパーキャビテーション(以下SCという)領域の $\sigma = 0.50$ および 0.27 の場合を見ると、同一の σ においても、スポット状気泡の長さは絶えず変化しており、さらに、それらの太さ、数も絶えず変化し、後方に渦キャビテーションを流出している。迎え角 α による変化は、 $\alpha = 5^\circ$ および $\alpha = 3^\circ$ ではそれぞれの領域における様相は良く対応しているが、迎え角 α が小となると、スポット状気泡の数が極端に少なくなり(1~2個)、スパン方向の極く局所のみ発生するようになる。

さて、ここで取り上げた $\alpha > 1^\circ$ のいわゆる第1領域のキャビテーションの主なるものは、核分

布の変化および流れの変化に極めて鈍感なスポットキャビテーションである。ほかに渦形，バンド形，大気泡形，気泡雲形などの各種のキャビテーションが多角的に発生している。

第4章 適列薄翼形のサブキャビテーション性能

以上の結果を踏まえて，高比速度カプラン水車用の薄い低抗力適列翼形の探究と既存翼列翼形研究の見直しの第一歩として，成功裡に実用に供されている3%厚みの増速翼列翼形まわりのSub. C状態におけるキャビテーションの様相，気泡の詳細な観察，キャビテーション性能の測定を試みた。

供試翼形は弦長 l ，スパンともに100mmである。また，整理の都合上，我々の翼列翼形にはすべてTHを頭書し，翼列状態（節弦比 $t/l=1.14$ ，迎え角 $\alpha_1=0^\circ$ ）のときの流入翼列角 $\theta_1=23^\circ$ および 35° ， θ_1 については後記の図5参照）に対応するNo.1およびNo.2，実験番号1，圧力分布型を示す数3，揚力係数 $C_{\infty}=0.6$ の有効数6，厚み比3%の3を列記して，TH11363，TH21363のように表示する。

図5(a)，(b)には肉眼により観測した発生状態の概略を示す。明らかに，発生箇所は，翼形の背面前縁のI領域と腹面前縁のII領域のみである。これらの図中の λ_0 および λ_1 はそれぞれ初生キャビテーションの発生箇所と消滅箇所を示し， I_0 ， II_0 はI領域およびII領域における初生を示す。翼列翼形TH21363には， $\alpha_{\infty}\leq 0^\circ$ の範囲でキャビテーションが発生し難い（本実験の $\sigma_{\infty}>0.2$ の範囲では全く発生しない）という優れた性質があり，実用面から注目される。

翼列翼形TH21363は，キャビテーションの失速が極めて起きにくく， C_{∞} ， $C_{w\infty}$ （揚・抗力係数）が広い σ_{∞} の範囲で σ_{∞} に無関係になるという優れた特徴を持つばかりでなく， $C_{w\infty}$ もこれまで研究された適列翼形のその最小で，極めて優秀な翼列翼形（ただし使用すべき θ_1 は約 35° ）と言える。

キャビテーション初生は，TH11363はTH21363よりII領域ではかなり早く初生し，I領域ではかなり遅く初生する。そして， α_{∞} を同一とすれば C_{∞} もほぼ同一となるという上記の事実と，前縁付近で急変している圧力分布とから，この著しい差は，「前縁付近の圧力分布の差に主として係わっている」と言えよう。

第5章 広いキャビテーション係数の範囲で性能が変化しない適列翼形

やや反りが大きく，比較的製作容易な円弧系翼形からなる適列翼形を取り上げ，「小翼列角の場合はいかにして前縁はく離，特にLong bubbleを防止するか」の問題を，増速翼列のSub. C性能をキャビテーションの様相との関連において詳細に解明した。

供試翼形（図6）は厚み比3.5%，弦長 l ，スパンともに100mmである。翼列状態は前章と同じであるが，翼形の実験番号（前から2桁目）は2，圧力分布型を示す数は2とした。

前縁はく離有りの翼列TH12263においては，有力な初生促進因子であるはく離泡が存在しないので初生はかなり遅いが，いったん発生するとはく離領域内に急速にキャビティが成長してSC状態になる。一方，前縁はく離無し翼列TH22263では，はく離泡が存在するので初生は当然かな

り早い、キャビティの成長は非常に緩やかである。このような事実は、「極くわずかな流入翼列角 θ_1 の変化によって、前縁背面近傍の境界層の状態が著変し、Sub. C 特性の支配因子である翼形背面の流れパターンが著変し得る」という第 6 章で示す翼列効果を明示するとともに、「いかにして安定な SC 状態に急速に移行できるか」という超高速流体機械の重要課題にも応えている。

前縁はく離有り、無し of どの翼列においても、キャビテーション失速点 σ_B が極めて小さいという優秀特性を呈し、注目される。極曲線 (図 7) をみると、流入翼列角 θ_1 が 23° と 35° と若干異なるだけであるが、曲線が σ_B に極めて敏感 ($\theta_1=35^\circ$ の場合) と鈍感なもの (既に背面にはく離流れが発生している) ので、キャビテーションの発生の有無にかかわらず $C_{a\infty}-C_{w\infty}$ 曲線がほぼ同一となる) と全く異質のものが現れ、注目される。この事実は、翼背面のはく離の有無、および、キャビテーションの様相の大差と良く符合している。

第 6 章 微小前縁形状差による翼列性能の著しい変化

前縁近傍形状のみがわずかに異なる 2 種の翼形について、節弦比 $t/l=1.14$ 、流入翼列角 $\theta_1=23^\circ, 35^\circ$ の高比速度カプラン水車用翼列翼形の Sub. C 性能を詳細に解明した。

本章で目的としている前縁形状差の影響を詳細に調べるために、前縁近傍の形状のみが異なる翼形 2 種 (翼形表示の末尾に I または II を付して区別する) を用意した。2 種の供試翼形をそれぞれ TH11363 および TH21363 と呼ぶ。なお、弦長 l 、スパンともに 100mm である。

図 8 には、供試翼列翼形 TH11363-I, TH11363-II および TH21363-I, TH21363-II の揚力、抗力曲線 $C_{a\infty}-\alpha_\infty, C_{w\infty}-\alpha_\infty$ を種々の σ_B について対比した。明らかに、抗力曲線は微小前縁形状差によって著しく変化している。例えば、 $\alpha_\infty=2^\circ, \sigma_B=0.5$ では、抗力への影響は 80% を越えている。 $\theta_1=35^\circ$ において、揚力係数 $C_{a\infty}$ が大となる大迎え角 ($\alpha_\infty>0^\circ$) の範囲内においては、低抗力翼列性能を呈する優れた前縁形状は翼形 II のもので、前縁付近で正圧面側が下方に反り、翼形前縁背面の曲率半径が大きい楕円形状に近いもので、流れがはく離しにくい形状のものであった。

前縁近傍で十分高精度を有する翼列のポテンシャル流れ解析から得られた前縁近傍の表面圧力分布、そして、これを基にして求めた境界層解析結果によるはく離流れと Short bubble の存在は、実験結果の微小前縁形状差による影響と良く符合している。

なお、低抗力適列翼形の見地から、はく離しない前縁形状について、前縁を楕円 (縦横比 $k=b/a$ 、局所迎え θ_0) で近似し、種々の k, θ_0 について計算し図 9 に示した。○印ははく離無し、×印ははく離有りを示す。点線内ははく離無しであり、今後の適列翼形の研究に十分考慮すべきであろう。

第 7 章 結 論

高比速度カプラン水車用の薄い低抗力適列翼形の組織的探究を試みた。得たる結果を要約すると次のようになる。

(1) 既存の翼形キャビテーション試験の見直しを迫るジョソソソ効果の発見を踏まえて、高速流体力学研究所 (現在改組により流体科学研究所) の翼形試験に多用された回流水槽内の試料水の核分布と

その経時変化とを系統的に解明し、キャビテーションが十分に発達しても核の経時変化が十分僅少に留まる事実を示し、高信頼性のキャビテーション試験の可能性を見い出した。

(2) 翼形まわりのキャビテーションは、従来考えられてきたように一元的ではなく多元的に発生していることを示した。したがって、今後の研究においては十分に注意が必要と言える。

(3) 上記の事実を踏まえて、節弦比 $t/l=1.14$ 、流入翼列角 $\theta_1=23^\circ$ 、 35° の典型的な翼列配置を例に取り上げ、3%厚みの高比速度カプラン水車用翼列翼形の性能をキャビテーションの様相との関連において系統的に解明し、十分低抗力の優れた翼形であることを示した。

(4) 次に、3.5%厚みの反りの大きい円弧系翼列翼形の試験から、小流入翼列角 θ_1 においては不可避とされてきた前縁はく離による抗力の増大が、実は、隣接翼形の増速効果によって効果的に抑制され得ることを示した。

(5) 薄い翼列翼形では、極く微小の前縁形状差によって性能は著しく変化するから、十分前縁の工作精度には注意が必要であろう。なお、既存水車の前縁形状の微小変更によって性能向上の可能性もあるわけである。

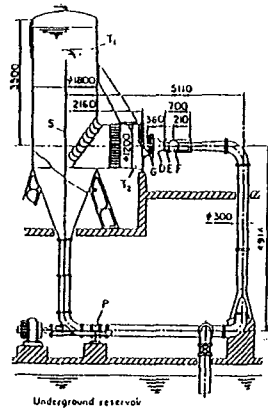


図1 試験水槽

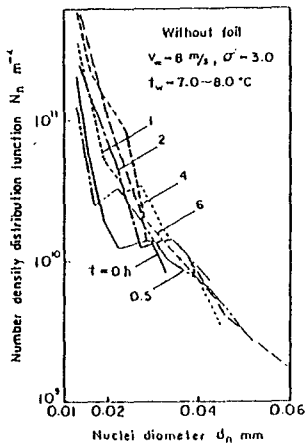


図2 核分布の経時変化（翼形なし）

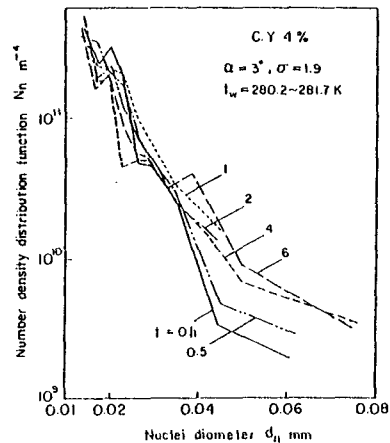


図3 核分布の経時変化（翼形あり）

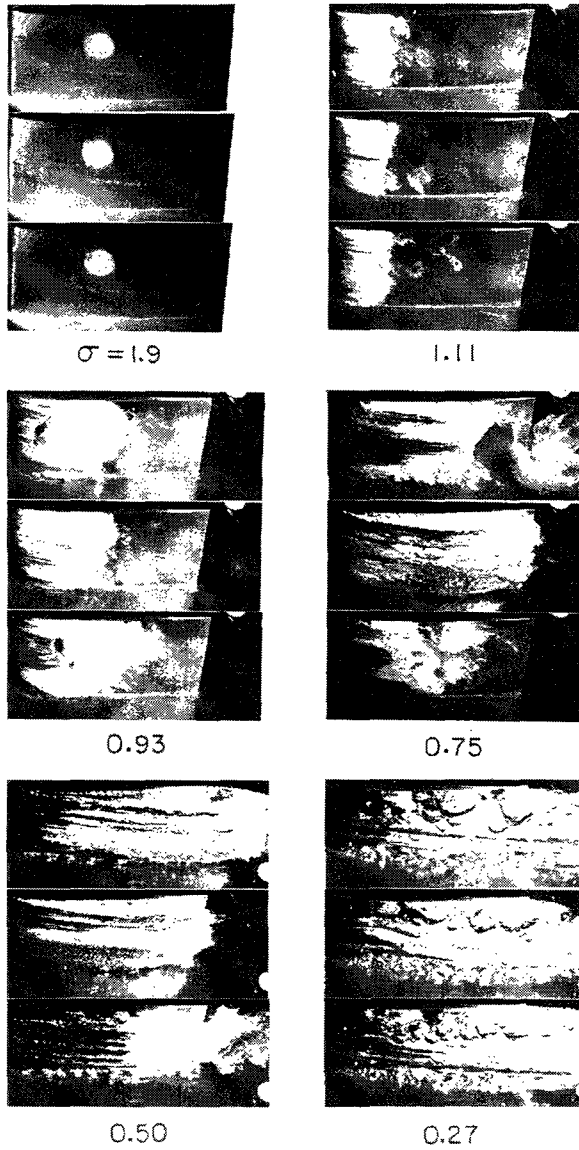


図4 キャビテーションの様相 ($\alpha = 3^\circ$, 1-zone)

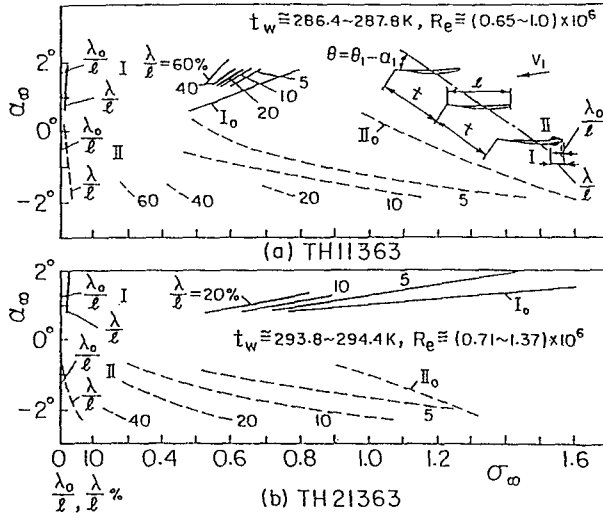


図5 迎え角 α_ω とキャビテーション係数 σ_ω におけるキャビテーションの発生状態

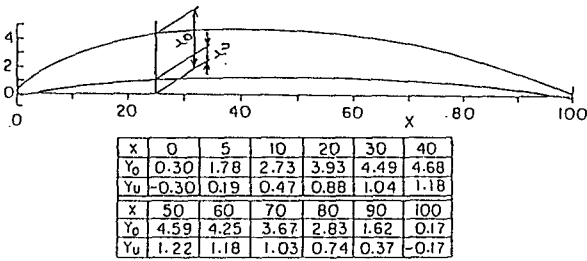


図6 供試翼形の形状 (厚み比3.5%)

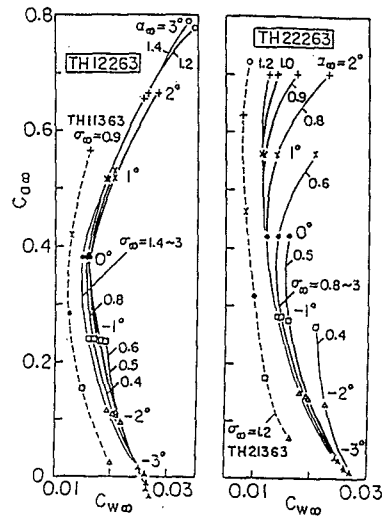


図7 流入翼列角 θ_1 とキャビテーション係数 σ_ω による極曲線の変化

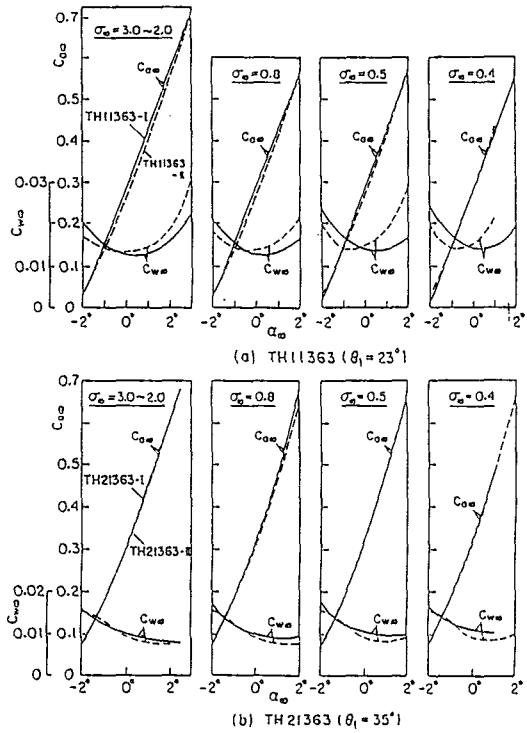


図8 前縁形状差による揚・抗力係数 $C_{l,0}$, $C_{d,0}$ の変化

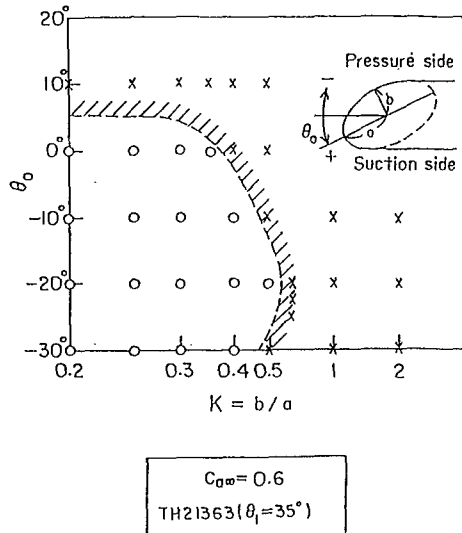


図9 種々の前縁形状の場合の前縁はく離の有無

審 査 結 果 の 要 旨

地球環境にやさしい水力エネルギーの開発が推進されつつあるが、開発予定地点の多くが大河川（大流量、低落差）に集中しているために、このような地点に十分適合する高性能の高比速度カプラン水車の開発が待たれている。

本論文は、高信頼性の試験法の確立を踏まえて行った高比速度カプラン水車用の薄い低抗力適列翼形の組織的研究の成果をまとめたもので、前編7章よりなる。

第1章は緒論である。

キャビテーションの様相は同一キャビテーション係数のもとでも試験水槽により大いに異なるとするジョンソン効果が見い出され、既存研究の見直しが進められている。よって第2章では、流体科学研究所で多数の翼形のキャビテーション試験に採用されてきた回流試験水槽を取り上げ、測定部に供試翼形有り、無しの場合について、キャビテーション核分布の経時変化およびキャビテーションの様相を系統的に調べ、本試験水槽は、核の経時変化が僅少に留まる極めて優れた試験水槽である事実を明らかにし、上記のジョンソン効果に対する要求に十分応えるとともに本研究の基礎を確立した。

第3章では、翼形まわりに発生するキャビテーションは、従来の適列翼形の試験において考えられてきたように一元的なものではなく、独自の生因、発生の様相、発生領域を持つ各種のものより多角的に構成されている事実を示し、適列翼形の既存試験の見直しの必要性を示す。これは注目すべき知見である。

以上の結果を踏まえて、第4章では、高比速度カプラン水車用の3%厚みの低抗力適列翼形を設計し、その翼形まわりのキャビテーションの様相および性能を定量的に明らかにし、低翼列角、薄翼形では前縁はく離は不可避で、好性能は期待できないであろうとの従来概念を破る優秀性能の適列翼形を見い出した。これは注目すべき知見である。

さらに、第5章では、広いキャビテーション係数の範囲で好性能の実用的適列翼形を見出し、さらに、第6章では、薄翼の適列翼形では前縁形状差の影響が著大であることを示し、既存水車の微小前縁修正により大幅な性能向上が計られることを示した。これは実用上重要な知見である。

第7章は結論である。

以上要するに本論文は、高比速度カプラン水車の高性能化を目的として、カプラン水車用適列薄翼形のキャビテーション性能を広い作動範囲において解明し、有用な多くの知見を加えたもので、流体機械学の進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。