

氏名	清 水 誠 二
授与学位	工 学 博 士
学位授与年月日	昭和 56 年 3 月 25 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	弾性変形するスーパーキャビテーション翼形に関する研究
指導教官	東北大学教授 村井 等
論文審査委員	東北大学教授 村井 等 東北大学教授 西山 哲男 東北大学教授 八巻 昇 東北大学教授 大場利三郎

論 文 内 容 要 旨

1. 緒 言

水中翼船, 船用推進機, 液体ロケット用ポンプなど, 液体を作動流体とする流体機械の超高速化を目的として, スーパーキャビテーション翼形が考案されて以来, 優秀な性能をもつ翼形が提案されている。それらの翼形の多くは, 抗力を減少させるため, 前縁付近を薄くしているが, スーパーキャビテーション翼形では前縁付近に集中圧が作用するので, 翼形自体の弾性変形あるいは弾性振動が, 翼形性能および流力弾性学的安定性に及ぼす影響が問題となる。しかしながら, この問題に関しては, 後縁固定の条件下の一定翼厚の平板翼の流力弾性学的安定性についての実験的研究があるのみで, 理論的研究は知見しない。本研究は, 上記の問題の理論的研究ならびに, それに関連する実験的研究をまとめたものである。

2. 後縁固定の場合 (空洞長さ ∞)

本章では, 図 1 に示すように, 翼形自体の変形の影響が最も顕著にあらわれると考えられる前縁自由・後縁固定の条件下で, 空洞が無限に長い場合について, 翼形自体の変形による流体力を求める理論を展開し, これを用いて, 翼形の定常特性, 翼形下面で空洞が発

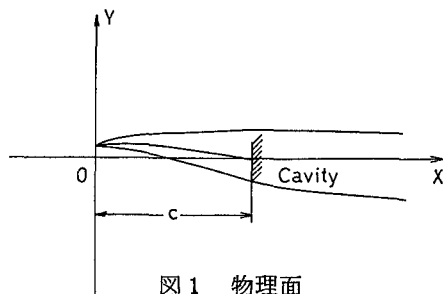


図 1 物理面

生する限界，翼材料強度上の限界，翼形自体の変形ダイバージェンスおよびフラッタ限界を明らかにした。

翼形の振動方程式は，(1)式で与えられる。

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(D \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) + r T \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = P(x, t) \quad (1)$$

ここで， r は翼材料の密度である。翼形の変形 w は微小であるものとして，定常項 $\bar{w}(x)$ と非定常項 $\tilde{w}(x)e^{j\omega t}$ の和で与えられるものとする。振動方程式は定常項と非定常項を分離することができる。翼形に働く流体力は，後述するように線形理論を用いて求める。また，図2に示す翼厚分布の翼形を考えると，翼形自体の曲げ剛さ D は次式で与えられる。

$$D = D_0 (X/c)^{3\beta} \quad (2)$$

ここに， D_0 は後縁における曲げ剛さである。定常項と非定常項を分離した振動方程式を，それぞれガラーキン法を用いて解くため， $w(x)$ ($\bar{w}(x)$ ， $\tilde{w}(x)$ をまとめて $w(x)$ とかく)を次の級数形で表現する。

$$w(x) = \sum_{n=0}^N a_n w_n(x) = \sum_{n=0}^N a_n c \left(\frac{x}{c} \right)^n \left(1 - \frac{x}{c} \right)^2 \quad (3)$$

(2)式および(3)式を用いると，前縁自由・後縁固定の条件を自動的に満足させることができる。流体力は， $\phi = -P/\rho$ で定義される加速度ポテンシャルを用いて解く。 P は圧力， ρ は流体の密度である。図1の物理面を線形化すると図3に示すようになるが，これを写像関数 $\zeta = \sqrt{Z/c}$ で

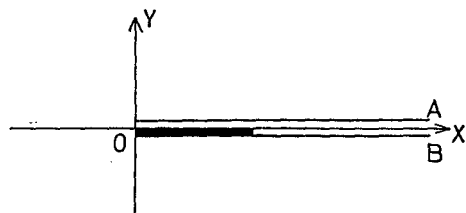


図3 Z面

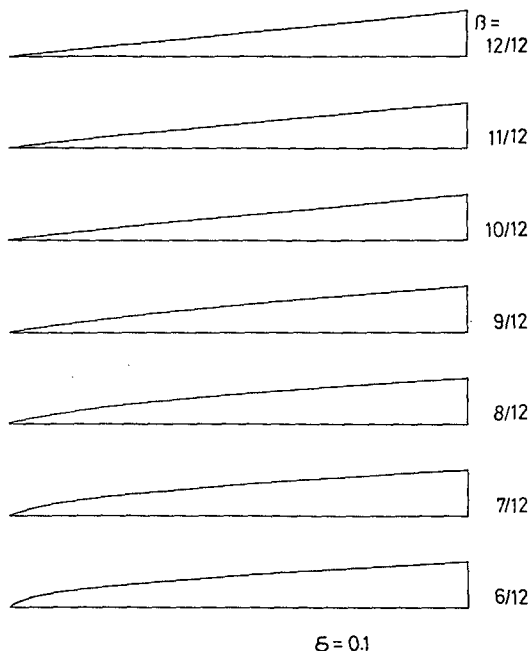


図2 翼厚分布

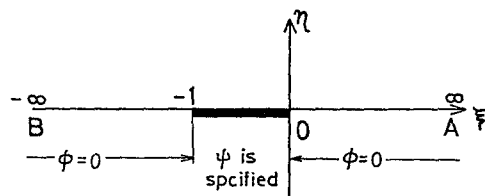


図4 ζ面

ζ面上半平面に写像すると，ζ面においては，実軸上で境界値が与えられた混合境界値問題となる。この解は，次式で与えられる。

$$F(\zeta) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\psi(\xi')}{\xi' - \zeta} d\xi' \quad (4)$$

ここで、 $F = \phi + i\psi$ で、 ψ は共役加速度ポテンシャルである。(3)式および(4)式から翼形の変形による流体力を求めることができるが、 a_n が未定である。これを決定するため、振動方程式に(3)式を代入し、その両辺に $w_n(x)$ を掛けて 0 から c まで積分すると a_n に関する連立一次方程式を得る。この連立方程式を解くことによって、 a_n を決定することができる。本章の理論および数値計算によって次のことを明らかにした。

(1) 翼形下面で空洞が発生する限界 翼形自体の変形によって、前縁近傍の領域を除いては圧力が低下する。このため、変形が大きくなると圧力が 0 以下となり、そこから空洞が発生する。翼形下面で空洞が発生する限界となる $A (= D_0 / \rho U^2 c^3)$ は、平板翼形では迎え角に依存せず一定値をとるが、円弧翼形では迎え角とともに増加する。また、前縁近傍にわずかな厚みを与えることによって、限界流速をかなり増加させることができる。

(2) 翼材料強度上の限界 限界流速を図 5 に示す。限界流速は翼厚比にほぼ比例して増加する。また、前縁近傍にわずかな厚みを与えることによって、限界流速をかなり増加させることができる。

(3) 翼形自体の変形ダイバージェンス限界 ダイバージェンス限界流速は、翼形下面で空洞が発生する限界流速よりも大きい。

(4) 翼形自体の変形フラッタ限界 限界となる A の値は、密度比 $\lambda (= r T_0 / \rho c)$ とともに一次的に増加する。ただし、限界となる無次元振動数がかなり大きな領域に存在したので、本解析の仮定の妥当性には疑問がある。

(5) 定常特性 抗揚比 (C_D / C_L) と A の関係を図 6 に示す。翼形の変形によって、抗揚比は増加するが、前縁近傍にわずかな厚みを与えることによって、その増加をかなり防止することができる。

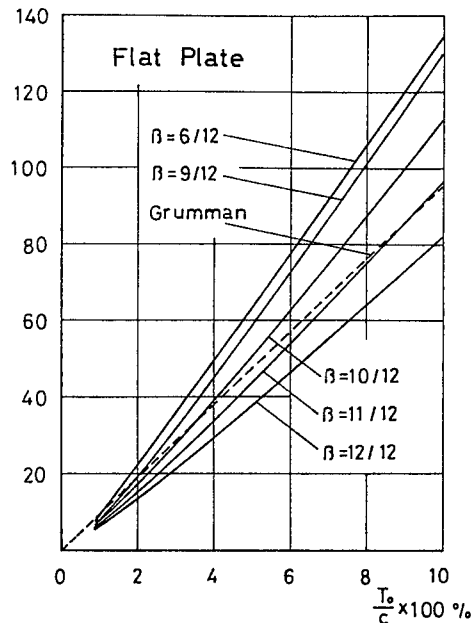


図 5 材料強度上の限界流速

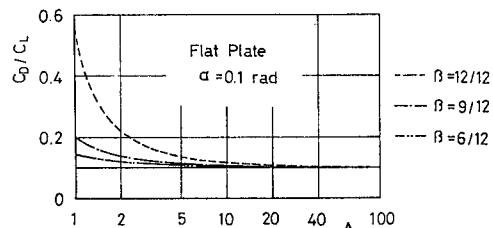


図 6 抗揚比と A の関係

3. 弾性支持で、回転および並進振動が可能な場合 (空洞長さ ∞)

本章では、図 7 に示すように、弾性翼形が流れに垂直な方向への並進振動および流れに垂直な軸まわりの回転運動が可能のように弾性的に支えられている系について、翼形自体の変形が翼の

ねじりダイバージェンス,あるいは,曲げ・ねじりフラッタ限界に及ぼす影響を明らかにした。

翼形の変形および流体力を求める方法は,前章と同様であるが, w に関する境界条件を考慮し, w を次の級数で表現する。

$$w(x) = \sum_{n=0}^N a_n w_n(x) = \sum_{n=0}^N a_n c \left\{ \left(\frac{x}{c} \right)^n \left(\frac{x}{c} - 1 \right)^4 \right.$$

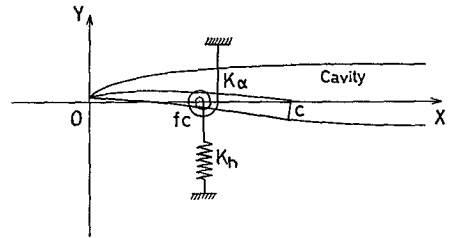


図7 物理面

$$+ \alpha_n \left(\frac{x}{c} \right) + \beta_n \} \quad (5)$$

翼のねじりダイバージェンス限界は,翼形の剛体的回転に関する釣り合い方程式と翼形の定常な変形に関する方程式を連立して解くことによって,また,曲げ・ねじりフラッタ限界は,翼形の剛体的回転および並進振動時の運動方程式と翼形自体の変形の振動方程式を連立して解くことによって,求めることができる。得られた結果のうちで,主なものは次の通りである。

(1) 翼のねじりダイバージェンス限界
前縁付近が薄い翼形の場合,翼形自体の変形によって限界流速は増加する。

(2) 曲げ・ねじりフラッタ限界 図8
に示すように, ω_h/ω_α (翼幅方向の曲げについての固有振動数とねじりについての固有振動数の比) の値によっては,翼形自体の変形によっては限界流速がかなり低下する。

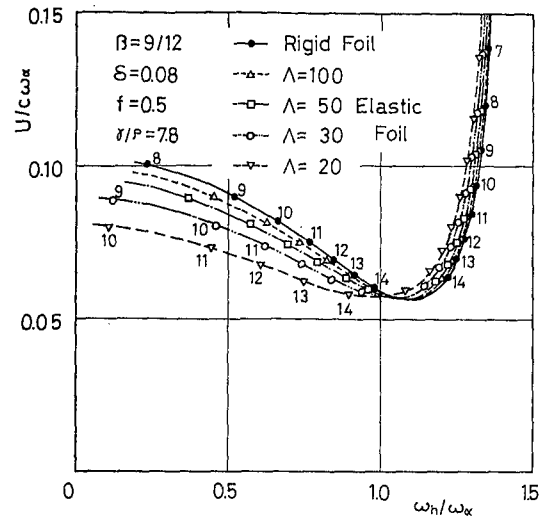


図8 曲げねじりフラッタ限界

4. 後縁で弾性支持で,回転あるいは並進振動を行なう場合(空洞長さ有限)

本章では,前縁自由・後縁固定の境界条件下の弾性翼形の定常特性,さらに,同様な境界条件下の翼形が後縁まわりの回転振動あるいは並進振動を行なう場合の非定常特性を求めた。ただし,前章までとは異なり,空洞長さが有限の場合を取扱っている。

流体力は,前章までと同様加速度ポテンシャルを用い,問題をく面の実軸上で境界値が与えられた混合境界値問題に変換してこれを解くことによって求めた。本章における加速度ポテンシャルは, $\phi = -(P - P_c)/\rho$ で定義する。ただし, P_c は空洞内圧である。また,空洞長さが有限なので,その長さの変動による流体力が存在するが,平均空洞長さ $\bar{\ell}$ は変動空洞長さ $\tilde{\ell}$ よりも十分大きいと仮定し,空洞長さの変動の影響は $\tilde{\ell}/\bar{\ell}$ の一次の項まで考慮し,高次の項は省略した。翼形の変形は,2章と同様(2)式で表わす。 a_n を求める方法は,前章までと同様である。得られた結果のうち主なものは次の通りである。

(1) 定常特性 翼形の変形によって、揚力係数は若干減少し、抗力係数は増加する。

(2) 非定常特性 図9に非定常揚力係数の例を示す。無次元振動数 κ が増加すると、非定常揚力係数の絶対値は、剛体翼形のそれよりもかなり大きくなる。

5. 有限長さ空洞の流れ模型および非定常特性の実験的研究

本章では、翼形の変形が翼形の定常および非定常特性に及ぼす影響を実験的に明らかにするための第一段階として、より好適な流れ模型を得るため、翼形自体の変形は無視できる翼形を用いて行なった実験について述べる。

実験は、密閉型の回流水槽を用いて行なった。測定部は200mm×1000mmの矩形断面で、流速は、7.5 m/s および 9.5 m/s で実験を行なった。供試翼形は、弦長150mm，翼厚比14%で、翼形自体の変形は無視できる。

(1) 定常特性 迎え角 9° から 15° の範囲で実験を行なった。揚力係数および抗力係数は、既存の実験結果とほぼ一致する。

(2) 非定常特性 平均迎え角 11° ，片振幅 $1^\circ 23'$ の後縁まわりの回転振動を行なう場合について実験を行なった。図10に4章で展開した理論による剛体翼形についての理論値とともに、非定常揚力係数の実験値を示す。絶対値は理論値と良く一致しているが、位相は、理論値と実験値とではかなり異なっている。

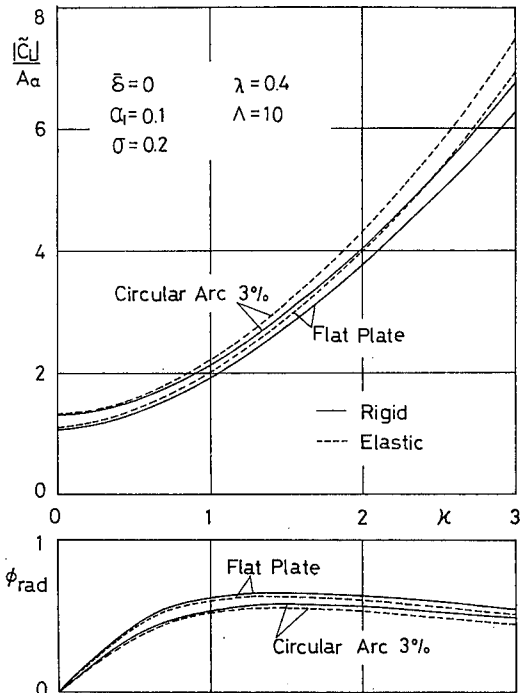


図9 弾性翼形の非定常揚力係数（後縁まわりの回転振動）

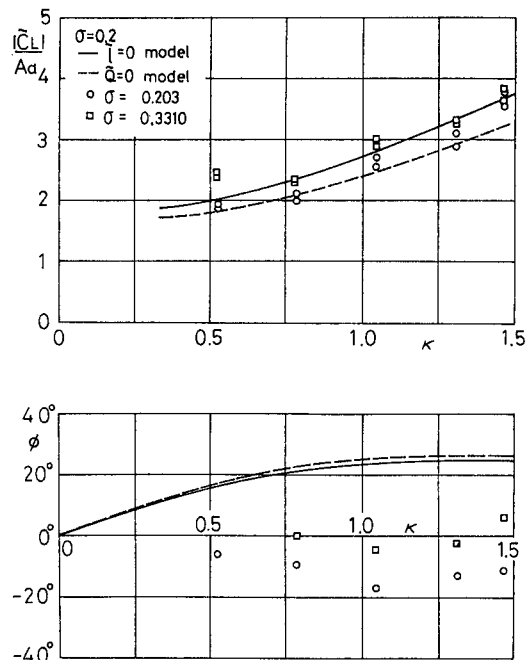


図10 非定常揚力係数

審査結果の要旨

水中翼船や船用推進器などの液体を作動流体とするターボ機械の超高速化を目的としてスーパーキャビテーション（以下SCと略記する）翼形が考案されて以来、優秀な性能をもつ翼形が提案されている。しかしながら、それら翼形の多くは厚みが小さく、特に前縁近傍が薄く、しかもSC翼形においてはその附近に流体圧が集中するため、翼強度のみならず、翼形自体の弾性変形あるいは弾性振動が翼形特性および流力弾性学的安定性に及ぼす影響が問題になりつつあるにもかかわらず、この問題に関連しては、厚み一定の平板翼の後縁固定の条件下におけるフラッタに関する実験的研究があるのみで、理論的研究は全く見当たらない。本研究は上記問題の理論的研究ならびにそれに関連する実験的研究の結果を取りまとめたもので、全篇6章よりなっている。

第1章は緒論である。第2章においては、前縁自由、後縁固定の条件下で、空洞が無限に長い場合に、任意形状のSC弾性翼形に作用する定常および非定常流体力と変形および振動の相互関係を求める理論を展開し、翼形の初期形状、剛性および厚み分布がその定常特性、作動条件、変形のダイバージェンスおよびフラッタ限界、材料強度上の限界に及ぼす影響を明らかにしている。

第3章は、流れに垂直な軸まわりの回転および流れに垂直な方向への並進が可能なように支持されている条件下における第2章と同様な理論を展開して、翼形自体の変形が、第2章と同様な定常特性、流力弾性学的安定性などに及ぼす影響のほか、回転あるいは並進振動時の非定常特性および曲げ・捩りフラッタ限界ならびに捩りダイバージェンス限界に及ぼす影響などを明らかにしたものである。

第4章においては、前縁自由、後縁固定の条件下の定常および非定常運動について、空洞長さ有限の流れ模型を幅広く選び得る、前章までと同様な理論を展開し、既に提案されている二つの流れ模型について、翼形自体の変形が定常および非定常特性に及ぼす影響ならびに翼自体の変形フラッタ限界の計算結果を示している。

第5章は実験的研究で、上記の弾性翼の諸特性を実証するための第一段階として、剛体翼について、第4章において仮定した流れ模型の実験結果との整合性を検討したものである。

第6章は総括である。

以上要するに、本論文はSC翼形自体の弾性変形が、その定常あるいは非定常運動時における定常および非定常特性、流力弾性学的な静的および動的安定性、材料強度上の限界などに及ぼす影響に関する新しい知見を与えたもので、流力弾性学ならびに流体力学の進展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。