

高速ボイラ給水ポンプ羽根車の光弾性実験

Photoelastic Experiment of the High Speed Boiler Feed Pump Impeller

本 堂 実*
Minoru Hondô

内 容 梗 概

この報告はボイラ給水ポンプがポンプ作用中にその羽根車に生ずる応力、特に羽根面上の応力分布について凍結法による三次元光弾性実験を行ない調べたものである。

光弾性模型について二種類の実験を行なった。はじめに光弾性凍結炉内の空気中における回転の実験から遠心力による応力を求め、次に光弾性模型羽根車をポンプ本体に取り付け、流体として使用した油の温度を制御することにより模型羽根車のポンプ作用時の応力を求めた。

その結果、ポンプ作用中に羽根車に生ずる応力として遠心力および流体の羽根面上に及ぼす圧力分布の両者の影響を明らかにし、これらの光弾性実験から実物金属製羽根車のポンプ作用中の応力が求められることを示した。

1. 緒 言

大容量で効率の高い火力設備が要求されるに従い、ボイラ給水ポンプの大形化および高圧化が必要とされるようになった。電動機直結のポンプでは段数が多くなるに伴い軸が長くなり、設計上別の困難を生じてくる。したがって回転数の高い高速ボイラ給水ポンプが設計製作されるようになった。

回転数が高くなると羽根車に生ずる応力は必然的に高くなるので、回転中羽根車に生ずる応力分布、特に羽根の根元付近の応力集中を明らかにしておく必要がある。

ポンプの羽根車は水中で回転するから、羽根車に生ずる応力は遠心力と流体の圧力分布の両者が同時に作用するものと考えられる。羽根車は立体的に複雑な形状をしているので、以上のような回転中の応力分布を求めることは簡単ではない。

このような羽根車の応力分布を調べるために、実験応力解析法として抵抗線ひずみ計または光弾性の利用が考えられる。

周知のように、抵抗線ひずみ計によればゲージを接着した位置の実物表面のひずみが直接測定できるという利点があるが、この羽根車のような形については最大応力の位置が不明であること、またそれを知るためには全表面くまなくゲージを接着しなければならないが、それはできないこと、またゲージが接着できる場所であってもその面の形状によって、たとえば羽根付根付近のように曲率半径が小さく、ゲージ長と同程度の場合には、この部分に応力集中が生ずると推定されるので、どの程度信頼できる値が得られるかわからないことなど、の理由によりわれわれは応力分布が一目してわかり、応力集中を知るのに最も適当⁽¹⁾な光弾性実験による方法を採用した。もちろん光弾性が万能ではないし、凍結法による三次元の実験の場合は変形と、実物と模型のポアソン比の若干の相違などの問題はあるが、これに対しては修正の方法もあり、羽根車の応力分布を求めるという目的には光弾性が抵抗線ひずみ計その他の測定方法より適切と考えられる。

回転体の遠心力による応力分布については理論的⁽²⁾および実験的研究⁽³⁾も多く、光弾性による方法としては常温法と凍結法による結果がいくつか発表されている。しかしながらボイラ給水ポンプの羽根車のように複雑な立体的形状の応力に関するものはわれわれの調べた範囲では報告されていない。

この報告は二種類の光弾性実験、すなわち (i) 光弾性模型羽根車を光弾性凍結炉の中において空気中で回転させる (遠心力による

応力分布)、(ii) 光弾性模型羽根車をポンプ本体に取り付け、流体に油**を用いてポンプ作用を行なわせながら応力を凍結する (遠心力+油の圧力による応力分布) を調べ、これらの実験から実物金属製羽根車のポンプ作用中の応力分布を求めることを試み、これに成功した。

すなわち、後述のように遠心力と流体の圧力による応力分布が分離できる。実際に羽根車に生ずる応力は複雑なものと考えられるが、ここでは特に羽根の前後面に沿う応力分布を求め、あわせて最大応力が遠心力のみによる場合と、遠心力と流体による羽根面上の圧力分布による場合とでどのように異なるかも調べた。なお光弾性を利用し流体を用いて応力を凍結するという方法はこれまで行なわれたことがない。

2. 理 論 的 考 察

2.1 羽根車の応力

ポンプ作用中羽根車には遠心力による応力と、流体の羽根面上に及ぼす圧力分布による応力が生ずると考えられる。設計上必要な値はこの際羽根車に生ずる応力である。

ここで行なった二つの光弾性実験から実物金属製羽根車のポンプ作用時 (水中) の応力を求めるには、後述のように実物と模型の幾何学的形状および流体による羽根面上の圧力分布について相似の条件が成立すればよい。

記 号

σ_c : 遠心力による応力 (kg/mm^2)

σ_h : 流体が羽根面上に及ぼす圧力による応力
(kg/mm^2)

ρ : 羽根車材料の密度 ($\text{kg-s}^2/\text{m}^4$)

ρ' : 流体の密度 ($\text{kg-s}^2/\text{m}^4$)

ω : 回転速度 (rad/s)

r_2 : 羽根車の外半径 (m)

[W流体を示す
 M羽根車の材料を示す

A : 空気 M : 金属 (実物)

W : 水 R : 樹脂 (光弾性模型)

O : 油

—: アンダーライン、既知 (実験から求まる)

~~~~: 波形アンダーライン、求めるもの

さて遠心力による応力  $\sigma_c$  と水圧による応力  $\sigma_h$  を次のような形に

\*\* 応力を凍結するために油を用いる。詳細は 3. 実験方法を参照

\* 日立製作所亀有工場



表わすことができる。

$$\sigma_c = \rho \omega^2 r_2^2 f_c \left( \frac{r}{r_2}, \theta, \frac{z}{r_2} \right) \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\sigma_h = \rho' \omega^2 r_2^2 f_h \left( \frac{r}{r_2}, \theta, \frac{z}{r_2} \right) \quad \dots\dots\dots (2)$$

$(r, \theta, z)$  は回転軸を軸とする円筒座標である。

われわれの求めたいのは金属製羽根車が水中において遠心力と水圧を受けているときの応力であるから、上記の約束に従って表わすと  $[\sigma_c + \sigma_h]_M^W$  である。これは (3) 式のように分離できる。

$$[\sigma_c + \sigma_h]_M^W = [\sigma_c]_M^W + [\sigma_h]_M^W \quad \dots\dots\dots (3)$$

ところで右辺の第 1 項は、樹脂（光弾性模型）羽根車が空気中で回転するときの遠心力による応力  $[\sigma_c]_R^A$  が空気中の実験から求められるから、金属と樹脂の羽根車の回転数および密度について換算すれば求められる。両者の寸法は等しいので

$$[\sigma_c]_M^W = [\sigma_c]_R^A \left( \frac{\omega_W}{\omega_A} \right)^2 \frac{\rho_M}{\rho_R} \quad \dots\dots\dots (4)$$

(3) 式の第 2 項は直接求めることができないので、樹脂の羽根車が油中で回転した場合の実験と空中で回転した実験から次のようにして求める（油中での遠心力による応力  $[\sigma_c]_R^O$  は空気中の遠心力による応力  $[\sigma_c]_R^A$  に回転数の補正をすればよい）。

$$[\sigma_c + \sigma_h]_R^O = [\sigma_c]_R^O + [\sigma_h]_R^O = [\sigma_c]_R^A \left( \frac{\omega_O}{\omega_A} \right)^2 + [\sigma_h]_R^O \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$\therefore [\sigma_h]_R^O = [\sigma_c + \sigma_h]_R^O - [\sigma_c]_R^A \left( \frac{\omega_O}{\omega_A} \right)^2 \quad \dots\dots\dots (6)$$

このようにして樹脂羽根車の油中における油圧による応力  $[\sigma_h]_R^O$  が得られるので、金属羽根車が水中で回転するときの水圧による応力  $[\sigma_h]_M^W$  は水と油の密度と両者の回転数の比を考慮して (7) 式のように求められる。

$$\begin{aligned} [\sigma_h]_M^W &= [\sigma_h]_R^O \left( \frac{\omega_W}{\omega_O} \right)^2 \frac{\rho'_W}{\rho'_O} \\ &= \frac{\rho'_W}{\rho'_O} \left( \frac{\omega_W}{\omega_O} \right)^2 \left\{ [\sigma_c + \sigma_h]_R^O - [\sigma_c]_R^A \left( \frac{\omega_O}{\omega_A} \right)^2 \right\} \quad \dots\dots\dots (7) \end{aligned}$$

以上のようにして、金属羽根車が水中で回転するときの応力  $[\sigma_c + \sigma_h]_M^W$  は遠心力による応力  $[\sigma_c]_M^W$ 、(4) 式と水圧による応力  $[\sigma_h]_M^W$ 、(7) 式を重ねれば得られる。

$$\begin{aligned} [\sigma_c + \sigma_h]_M^W &= [\sigma_c]_M^W + [\sigma_h]_M^W \\ &= [\sigma_c]_R^A \left( \frac{\omega_W}{\omega_A} \right)^2 \frac{\rho_M}{\rho_R} + \left\{ [\sigma_c + \sigma_h]_R^O - [\sigma_c]_R^A \left( \frac{\omega_O}{\omega_A} \right)^2 \right\} \left( \frac{\omega_W}{\omega_O} \right)^2 \frac{\rho'_W}{\rho'_O} \quad \dots\dots\dots (8) \end{aligned}$$

## 2.2 光弾性実験と実物との相似性

実物の金属製羽根車と光弾性模型羽根車の応力分布の相似性については、実物と模型の幾何学的形状および流体による羽根面上の圧力分布について考える必要がある。

形状については実物と模型と等しい寸法に製作したので考慮する必要はなく、流体による羽根面上の圧力分布の相似性について検討すればよい。

光弾性模型羽根車は油中、実物羽根車は水中における回転であるが両者の羽根面上に生ずる圧力分布の形状が等しければ 2.1 節の各式に示されているように、油中の模型実験の結果から、水中における実物の場合の応力を推定することができる。

圧力分布の形状は一般にはレイノルズ数によって変化する。しか

しレイノルズ数がある程度（臨界レイノルズ数）以上大きくなると圧力分布の形はほぼ同じであるといわれている。臨界レイノルズ数は物体の形状によって異なる。本実験の羽根のような形についての実験結果はわれわれの調べた限りでは見当たらないが、平板もしくは翼形の場合には臨界レイノルズ数が約  $3 \times 10^5$  であるから、この実験の場合にもほぼこの程度と思われる。レイノルズ数  $Re$  は

$$Re = \frac{wl}{\nu} \quad \dots\dots\dots (9)$$

ここで  $w$  : 流体の羽根入口もしくは出口の相対流速 (m/s)

$l$  : 羽根 1 枚の長さ (m)

$\nu$  : 動粘性係数 ( $\text{m}^2/\text{s}$ )

羽根入口のレイノルズ数は模型の場合約  $3 \times 10^5$ 、実物の場合は  $594 \times 10^5$  であり、羽根出口でのレイノルズ数もほぼこの程度の値である。すなわち模型および実物のレイノルズ数は臨界レイノルズ数 ( $3 \times 10^5$ ) と同程度もしくはそれより大きいので、上述のことから模型と実物との圧力分布の形状は大体同じであると考えられる。

したがって前節に示した各式から応力の算出を行なってもよいと思われる。

## 3. 実験方法

### 3.1 実験装置

羽根車は立体的に複雑な形をしているので光弾性模型に応力を凍結しないと解析はできない。

遠心力による応力を凍結するには、光弾性凍結炉内において模型羽根車を回転させた。第 1 図は光弾性模型羽根車を炉内の回転軸に取り付けた状態を示したものである。

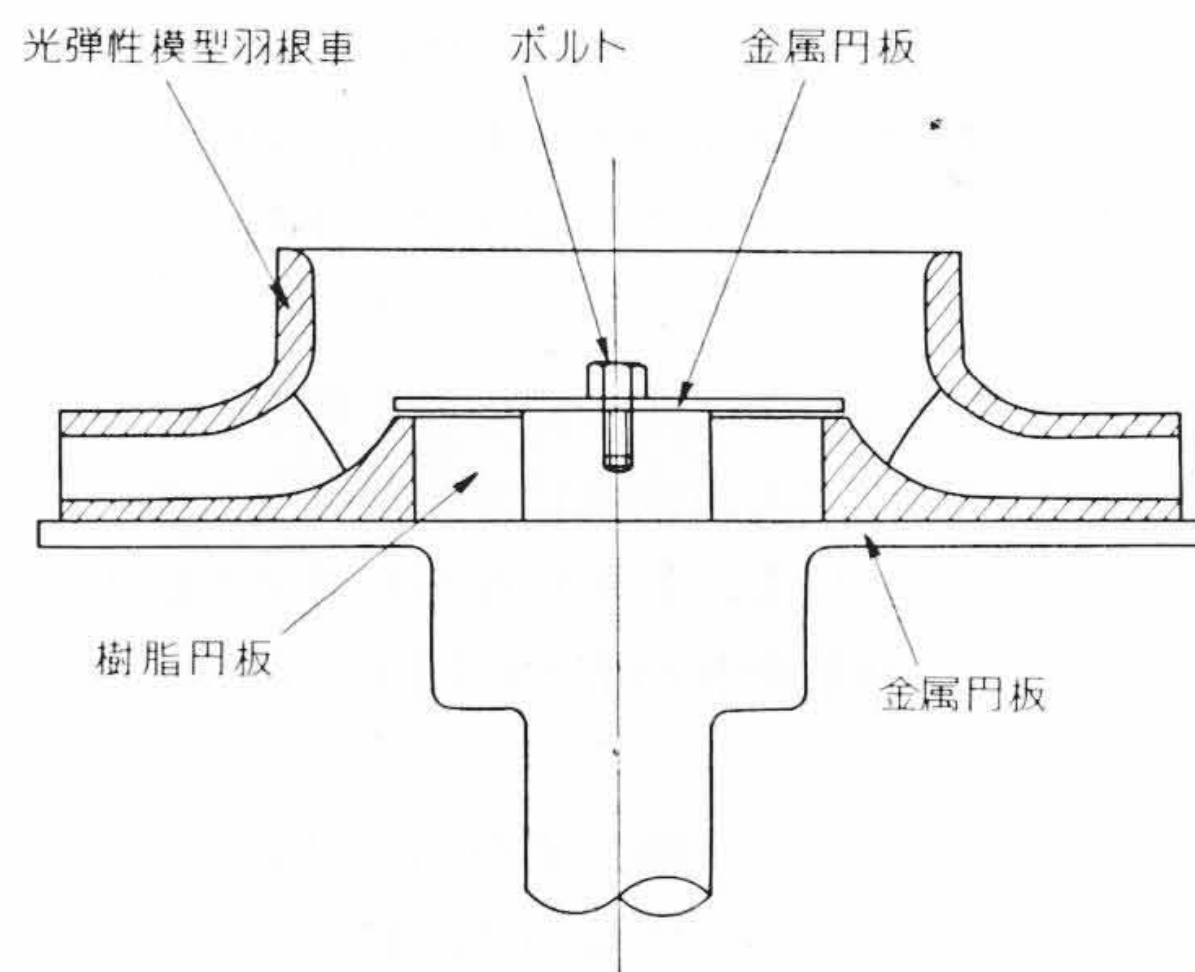
ポンプ作用中羽根車に生ずる応力を凍結させるためにはポンプのケーシング内に金属製羽根車と等しい寸法の光弾性模型羽根車を取り付け水を満たして回転させればよい。しかしながらこの模型材料の応力凍結最適温度は  $120^\circ\text{C}$  であるから水のかわりに油（パラフィン系鉱油に安定剤を配合した焼入油 Condor Quenching Oil V）を用いて所要温度を得た。

第 2 図はこの実験を行なった装置の概略を示したものである。装置全体、すなわちタンク、ポンプケーシングおよびパイプの中に油を満し、ポンプを運転させた。タンクはカバーなしでこの中にパイプヒータを入れ、油を加熱しながらポンプ作用を行なわせた。

タンク内の油温を測定し、また樹脂製羽根車が回転しているケーシング内にも温度計を差し込み、光弾性模型の応力凍結温度を調整した。遠心力による応力を凍結する場合に空気温度を制御したのとほぼ同様の応力凍結サイクルに従った。

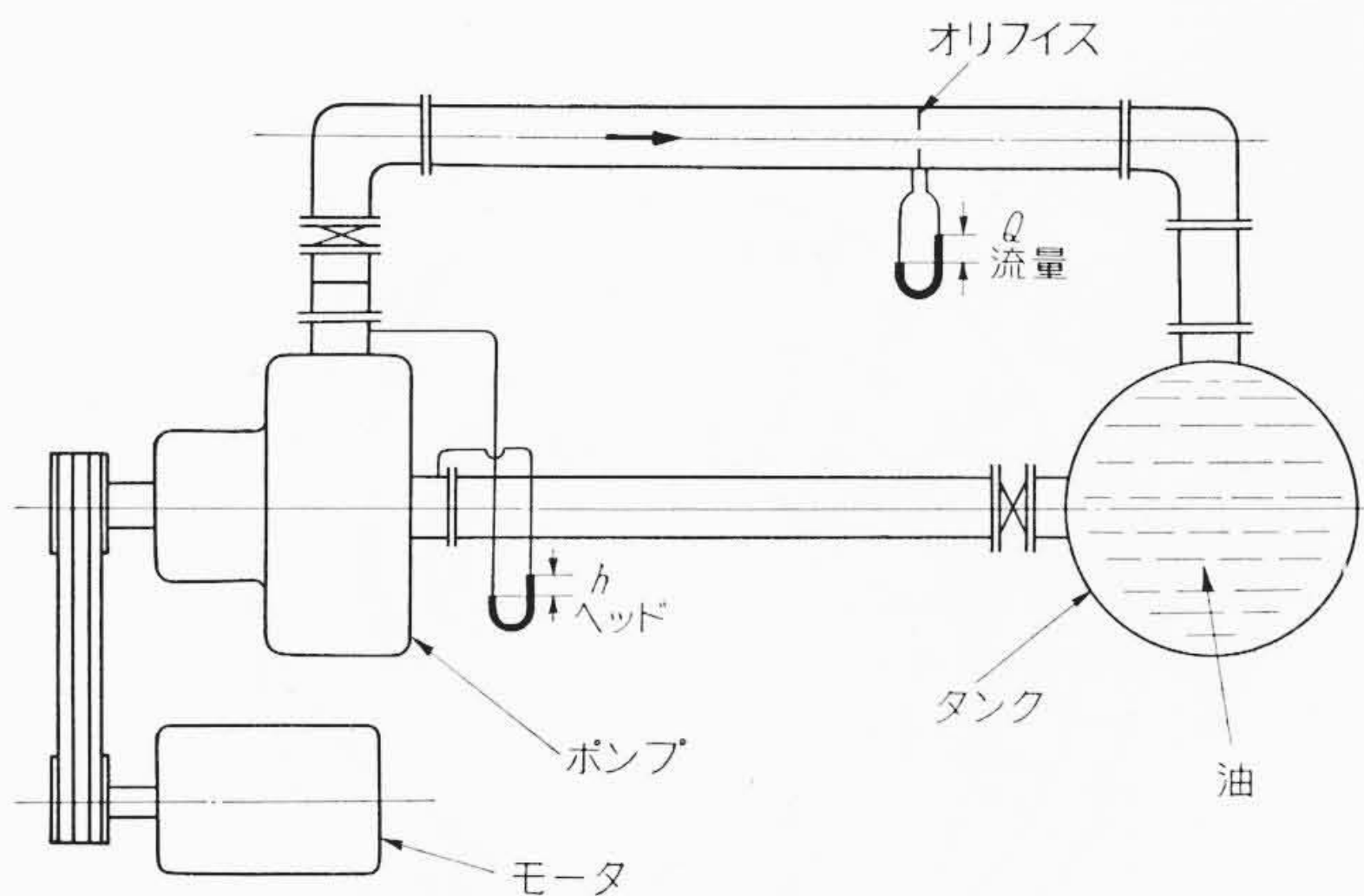
ポンプ本体は口径 100 mm の片吸込ポリユートポンプで、5 馬力の可変整流子モータにより駆動された。

本実験の目的はポンプ効率を問題にしているのではないが、通常

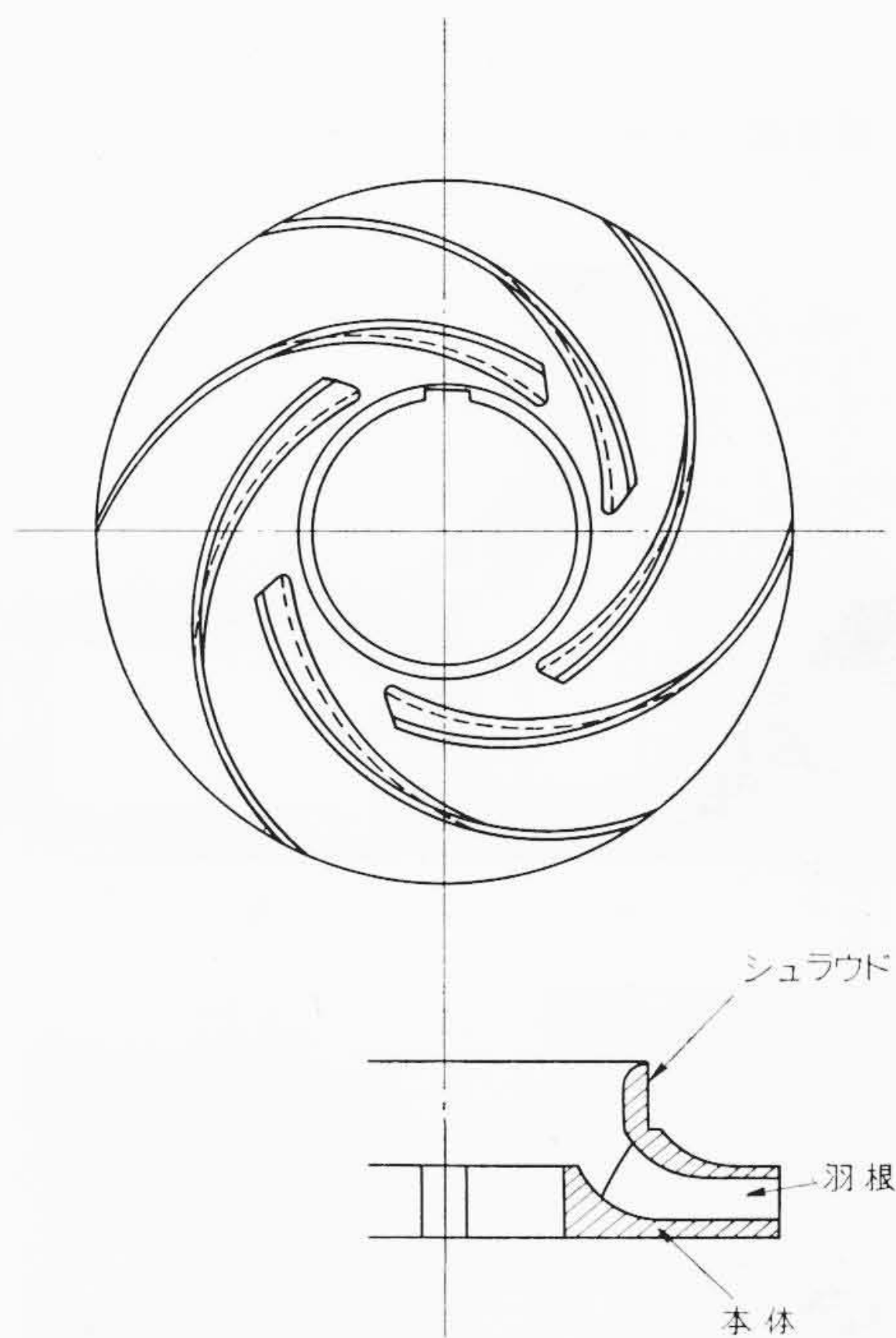


第 1 図 光弾性模型羽根車を回転装置に取り付けた状態





第2図 油を用いた実験装置（ポンプ作用中）



第3図 光弾性模型羽根車

のポンプ作用を行なっているかどうかを知るために、ヘッドと流量を調べてそれを確認した。

### 3.2 光弾性模型羽根車

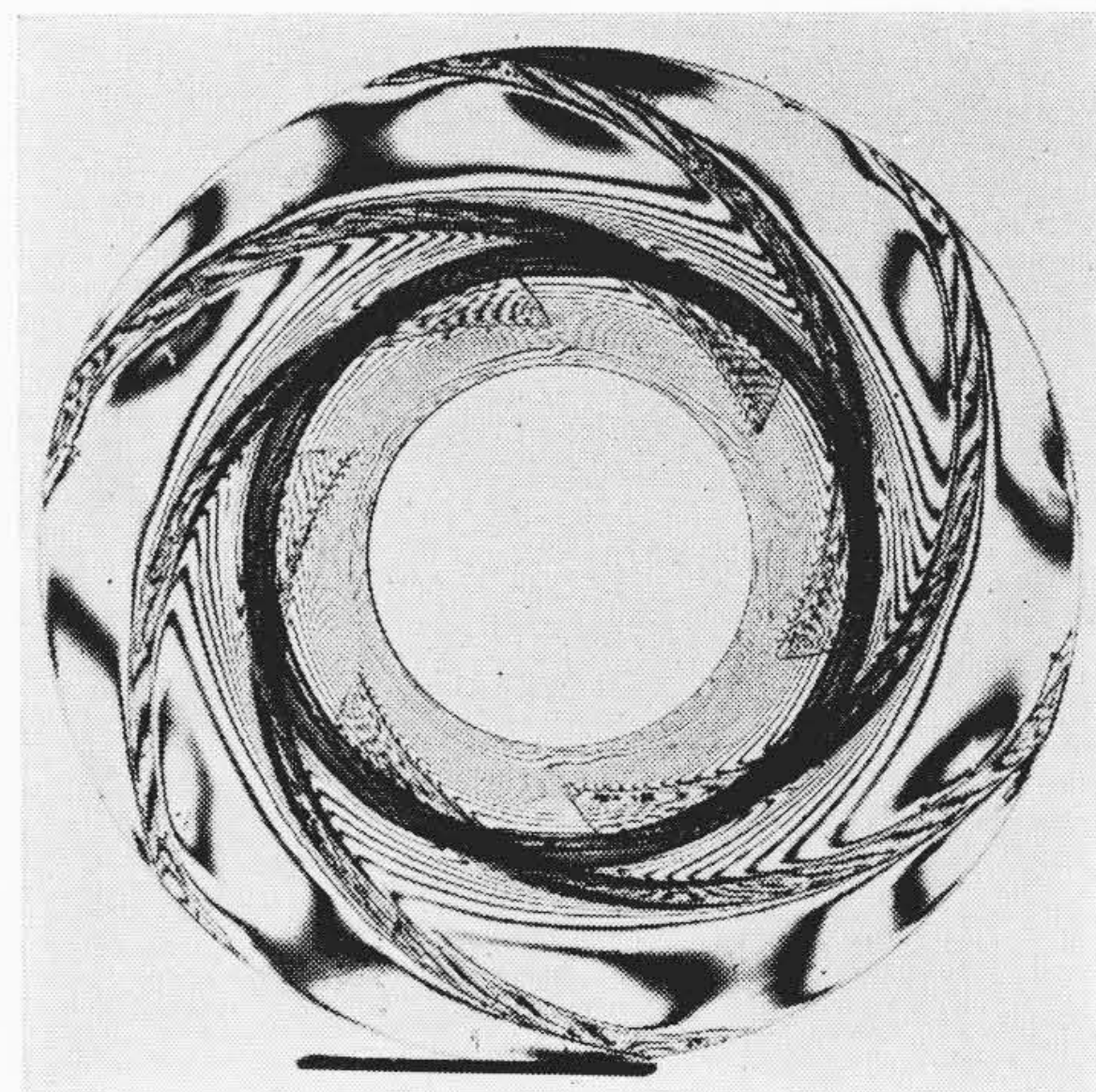
模型材料はアラライトBに硬化剤901を加えて加熱硬化させたものである。模型の製作は本体、羽根およびシュラウドの三種類をそれぞれの鋳型に注型し、完全に硬化させた後本体、シュラウドは旋盤加工、羽根は手仕上を行ない、これらを接着し最終の仕上げを行なった。第3図は羽根車の形を示したものである。この光弾性模型の寸法は実物大である。

### 3.3 光弾性実験

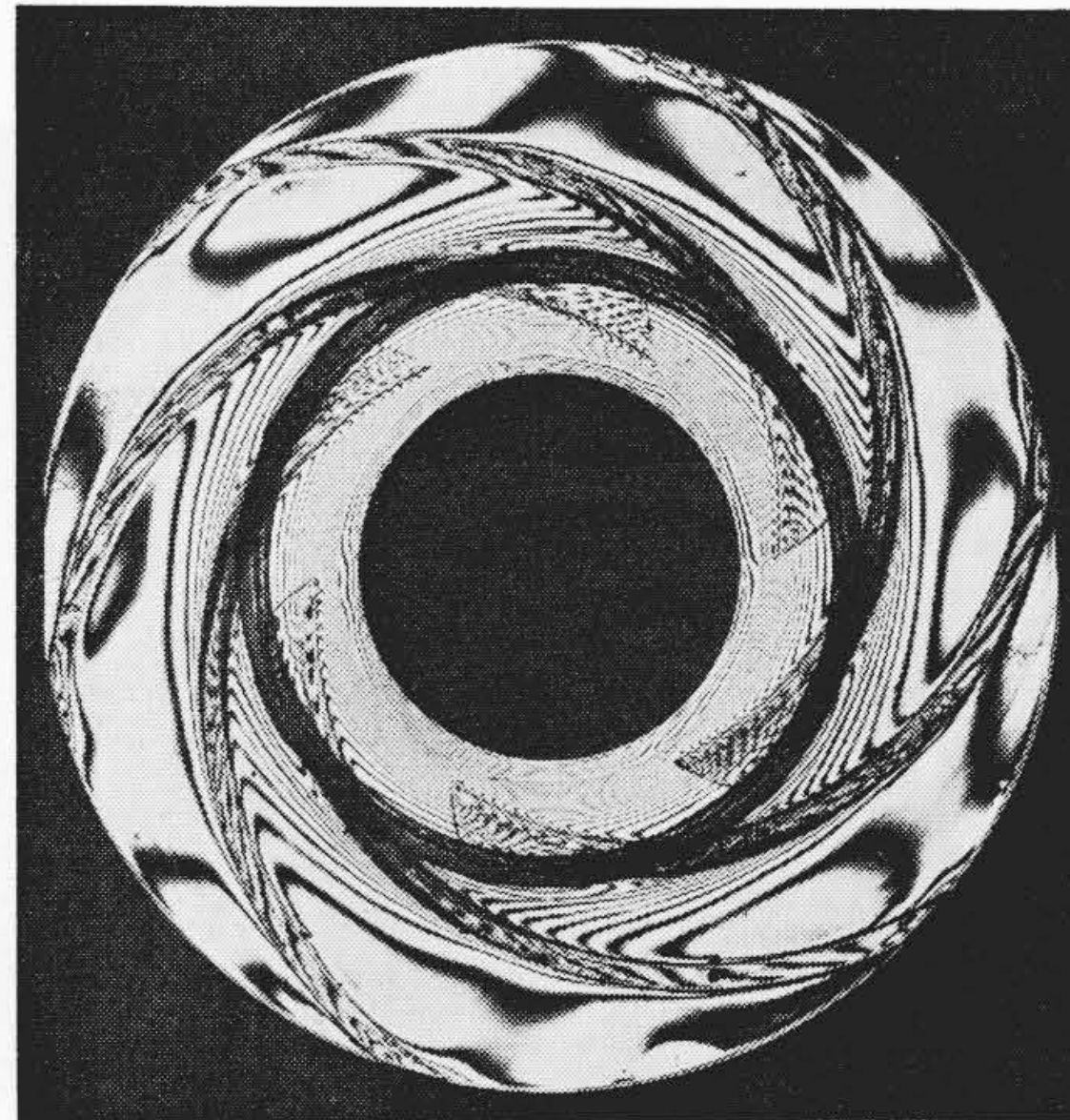
光弾性実験は応力解析に適当なしま次数を光弾性模型に生ぜしめるように応力を与えるのが望ましい。また模型が軟化した状態で破壊しない範囲に制限されるから、遠心力のみの場合と油中の場合とでは当然回転数は異なる。

#### 3.3.1 遠心力による応力凍結

空気中における光弾性模型の回転数はR. Grammel法による計算と有孔回転円板の計算を参考にして大凡推定した。回転によって生じた光弾性しま模様を凍結した模型羽根車全体を浸漬液槽に浸し、羽根車の軸方向に偏光を透過させ撮影したものが第4図(a)明視野、(b)暗視野等色線写真である。



(a) 明視野



(b) 暗視野

第4図 遠心力による応力分布を凍結した等色線写真

#### 3.3.2 油中における応力凍結

ポンプ作用を行なう油中での回転数は予備実験より定めた。ポンプから送り出される油量は吐出側の弁で調整し、ポンプの平常運転において応力を凍結した。

遠心力により応力を凍結した羽根車の等色線写真第4図に相当するものが第5図(a), (b)である。第4, 5図の模型羽根車から応力分布を調べるために第6図のようにスライス(薄片) s. No. 1 ~ s. No. 8 をとりそれぞれ等色線写真を撮影した。その例として空気中と油中において回転させた二つの羽根車から取り出したスライス s. No. 2 (第6図参照) の等色線写真を示したものが第7図(a), (b)である。

## 4. 実験結果と検討

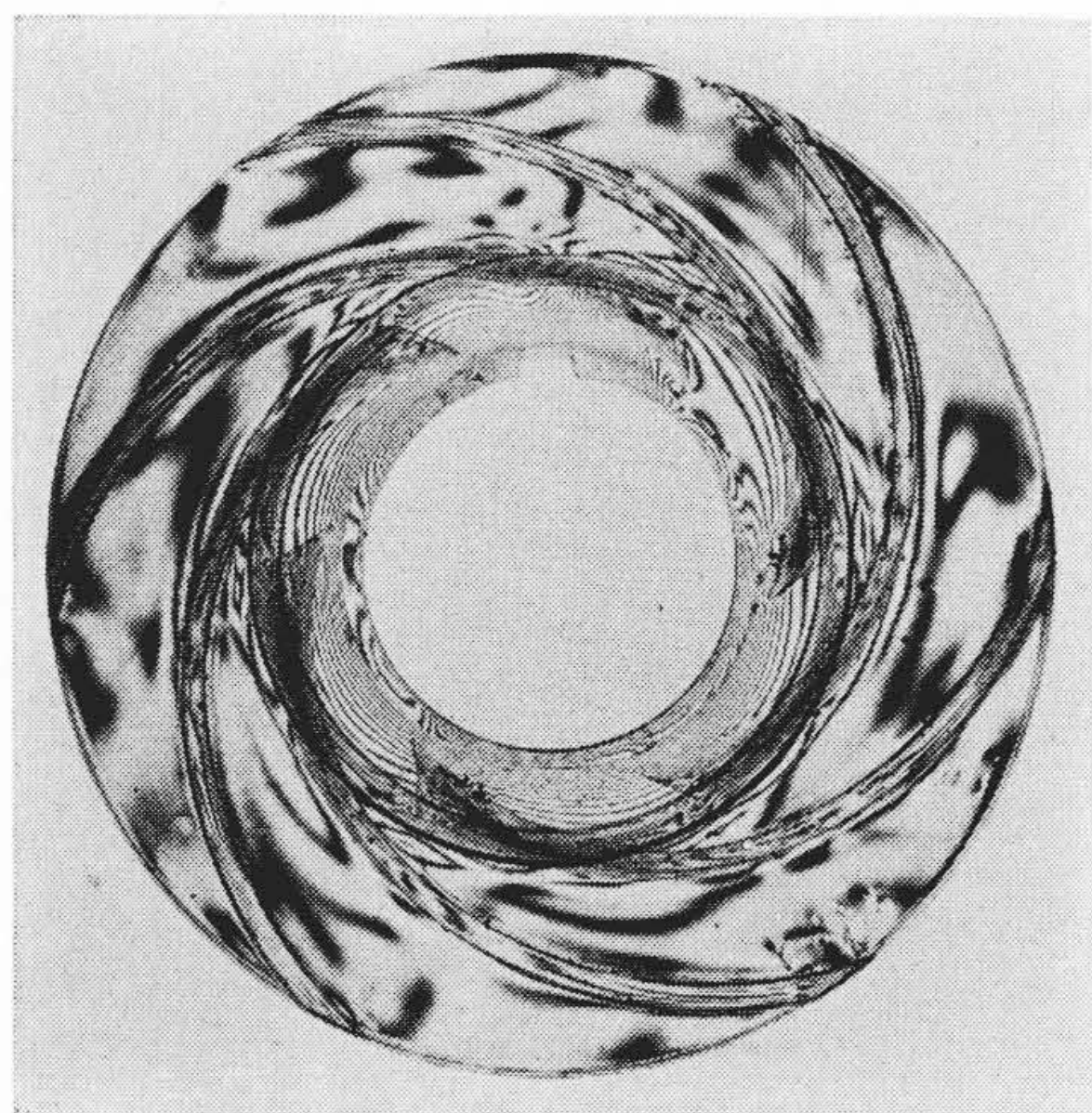
金属製羽根車の羽根面上に生ずる応力分布は二種類の光弾性実験から2.1節の方法により求められる。

羽根に生ずる応力はスライス s. No. 1, s. No. 2 が比較的大きく, s. No. 3 以下は次第に小さくなっている。第7図(a), (b)の等色線写真から(3)~(8)式により金属製羽根車の応力を求めることができる。

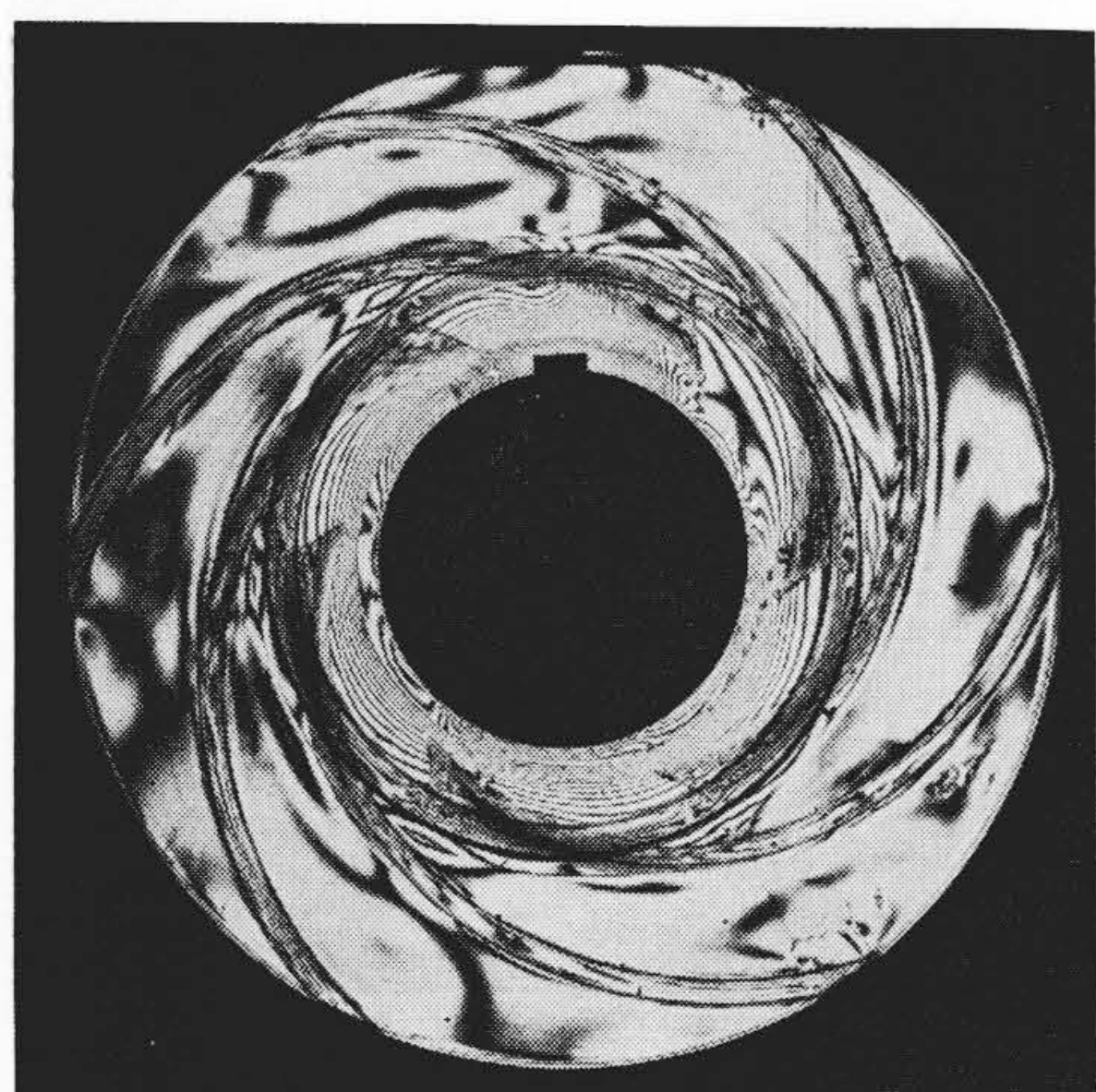
第7図(a)は空気中における樹脂羽根車の回転によるしま次数の分布であるから、これから(4)式の  $[\sigma_c]_R^A$  が得られる。したがって金属羽根車の回転数と密度を知れば実物羽根車の遠心力による応力  $[\sigma_c]_M^W$  分布が求められる。

第7図(b)は遠心力に流体の羽根面上に及ぼす圧力分布が加わって生じたしま次数分布であるから、これより(5)式の  $[\sigma_c + \sigma_h]_R^0$  が得られる。これから金属羽根車の水圧による応力  $[\sigma_h]_M^W$  は(6)~





(a) 明 視 野



(b) 暗 視 野

第 5 図 ポンプ作用中の応力分布を凍結した等色線写真

(7)式のようにして得られる。

ポンプ作用を行なう場合の応力は、以上のようにして得られた遠心力による応力 $[\sigma_c]_M^W$ と水圧による応力 $[\sigma_h]_M^W$ を加えれば求められる。

同様にしてそれぞれのスライスについてしま次数分布をプロットすれば、ポンプ作用中の応力 $[\sigma_c + \sigma_h]_M^W$ の分布が得られる。

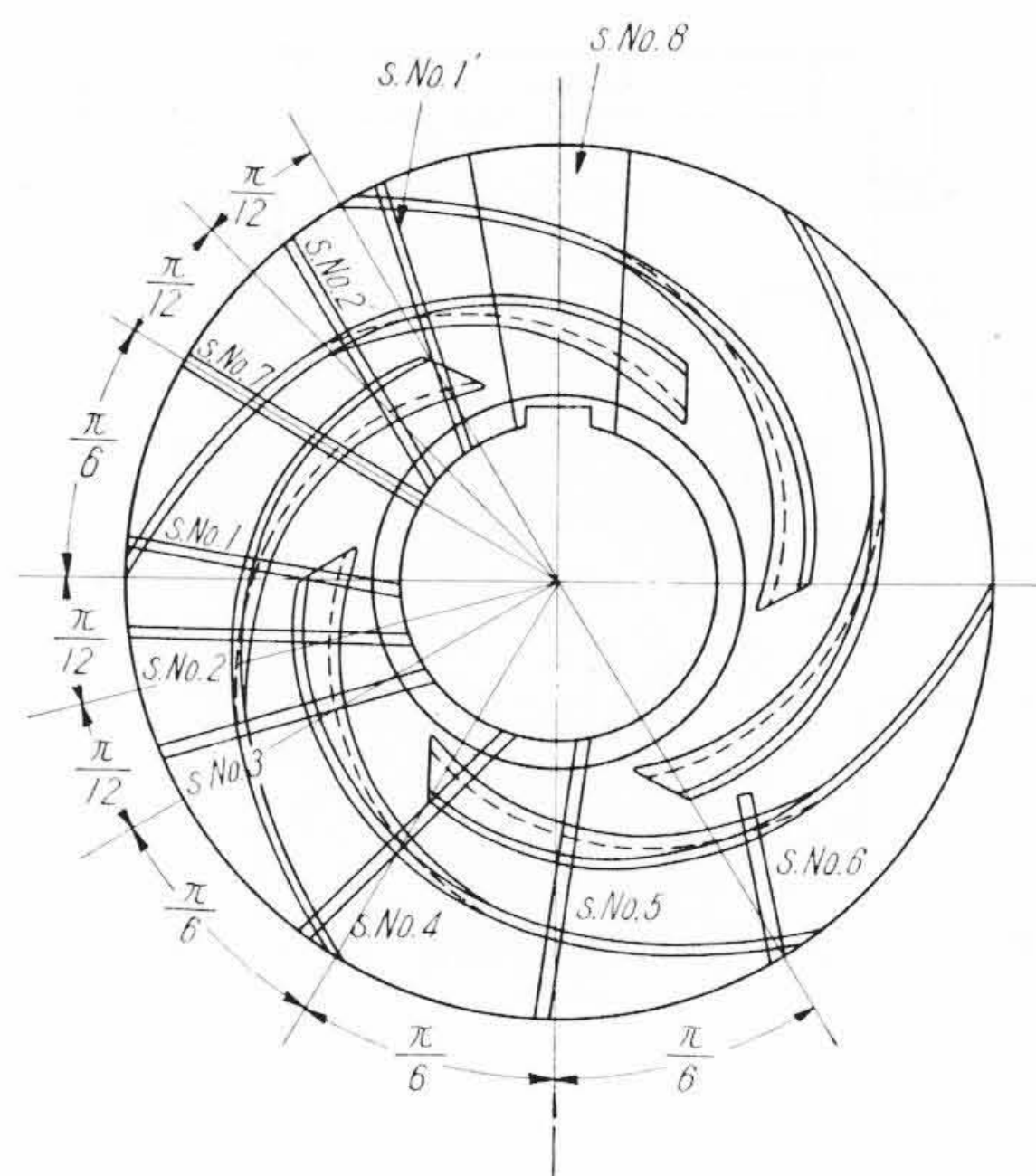
## 5. 結 言

ボイラ給水ポンプの羽根車は水中で回転するために遠心力と流体による羽根面上の圧力分布の影響を同時に受ける。ポンプ羽根車のように複雑な形状のものが回転する場合の応力分布については遠心力のみによる応力分布についても、これまで報告されたことはないように思われる。まして流体の圧力分布による応力についてはさらに未知の分野であったと思われる。

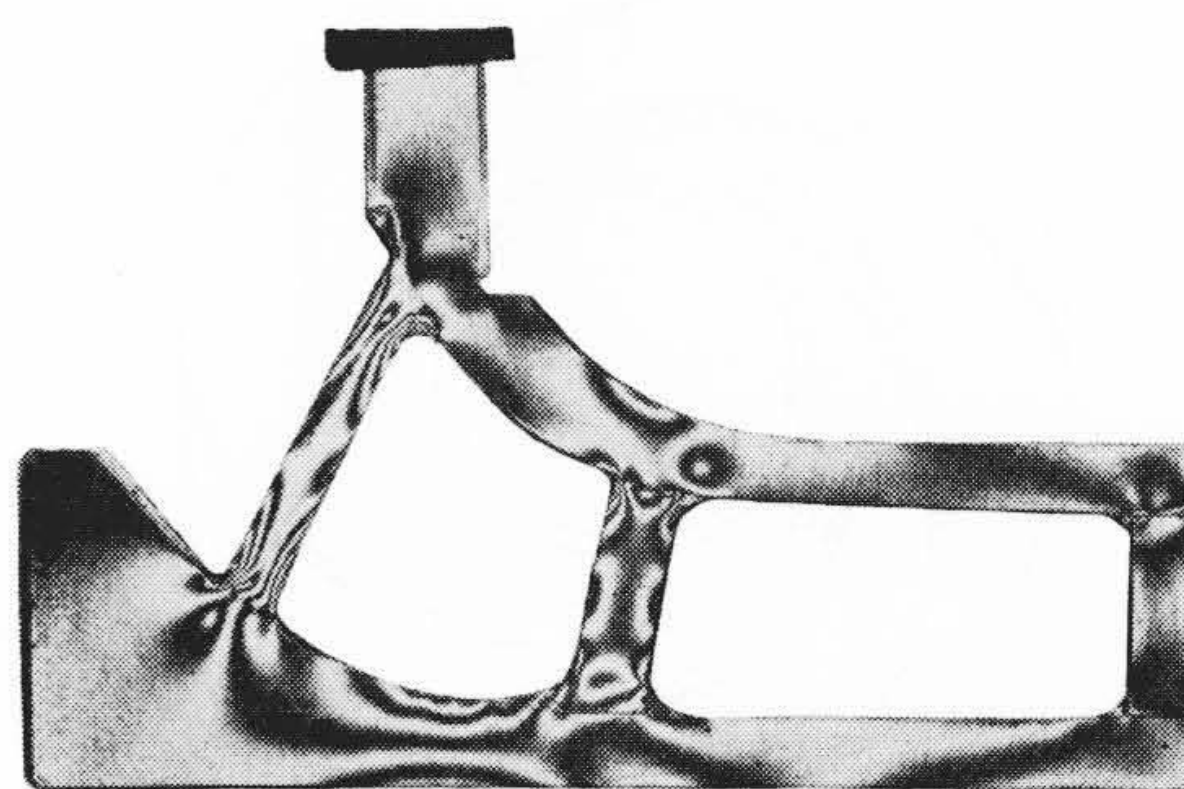
われわれは凍結法による三次元光弾性実験によりまず遠心力による応力分布を求め、次に油中で樹脂羽根車を回転させ、(遠心力)+(油圧)による応力を凍結し、これら二種類の実験から遠心力による応力と油圧による応力を分離し、あわせて金属製羽根車のポンプ作用中の応力分布を求めることに成功した。

## 参 考 文 献

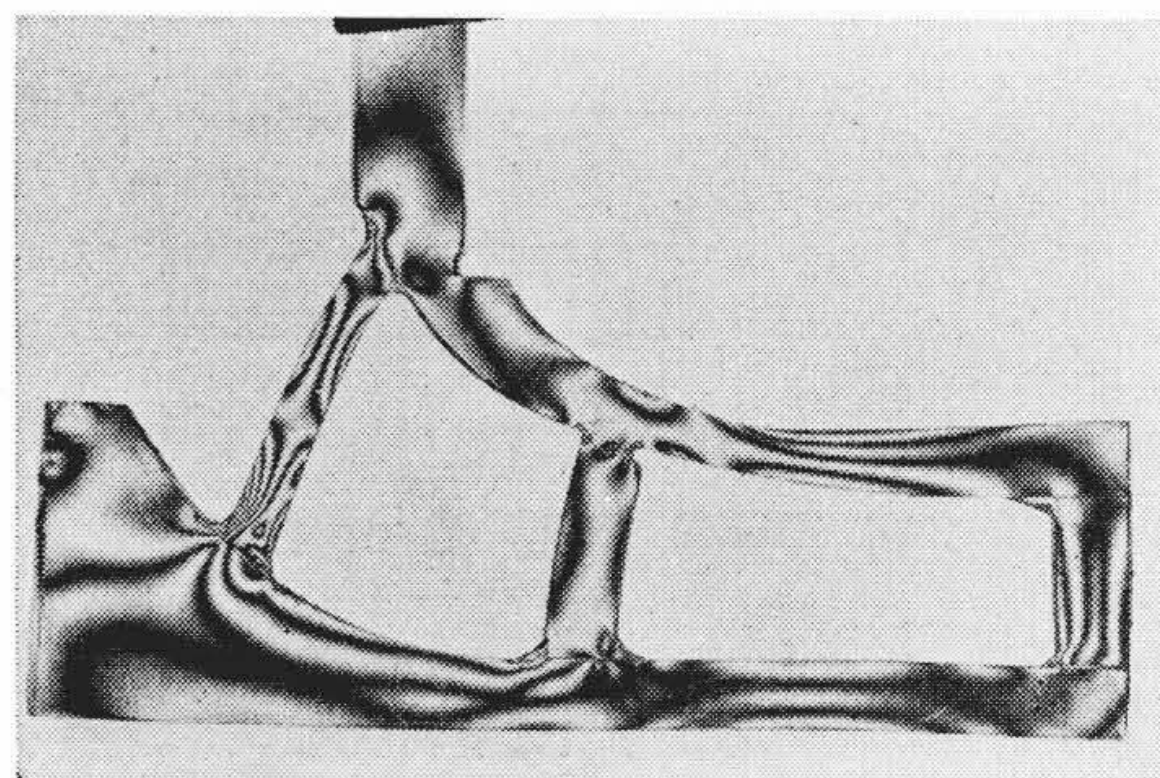
(1) 宮本：応物学会誌 31, 10, 845 (昭 37-10)



第 6 図 光弾性模型羽根車のスライス位置図



(a) 遠心力による応力分布



(b) 遠心力と油圧による応力分布

第 7 図 スライス s. No. 2 の明視野等色線写真

- (2) G. B. Jeffery: Phil. Trans. Roy. Soc., London, A221, 285 (1921)  
井口, 長岡: 機学誌 33, 1, 88 (昭 5-1)  
栖原: 機学論 3, 10, 1 (昭 12-2)  
溝口: 機学論 7, 26, 19 (昭 16-2)  
C. Concordia, M. F. Dowell: J. App. Mech., 13, 4, A-271 (Dec. 1946)  
T. Udoguchi: Japan Soc. Rev., Ser. 1, 53 (1949)  
T. Udoguchi: Proc. 2nd Japan Nat. Cong. App. Mech., 67 (1952)  
D. A. Thurgood: Engineer 24, 869 (Nov. 1961)
- (3) 西田: 理研集報 16, 9, 719 (昭 12-9)  
M. Hetényi: J. App. Phys., 10, 295 (May. 1939)  
M. Hetényi: J. App. Mech., 6, A 151 (Dec. 1939)  
河田: 科研報告 30, 2, 93 (昭 29-3)  
R. Guernsey: Exp. Mech., 1, 1, 1 (Jan. 1961)