

UDC 539.4.012

621-25

航空技術研究所資料

TM-11

光弾性による高速車盤の縞模様

永井文雄

1963年2月

航空技術研究所

光弾性による高速車盤の縞模様

永井文雄

1. 緒言

この報告は、ガスタービン・軸流圧縮機のような高速翼車における車盤の応力解析を行なうことの目的として行なった実験を示したものである。実験は円板ならびに円板の外周に実際の翼車の翼に相当する質量をつけて、円板の応力状態を光弾性による縞模様から観察したものである。なお、縞模様の観察は、応力凍結法と皮膜法の二つの方法によって行なってみた。

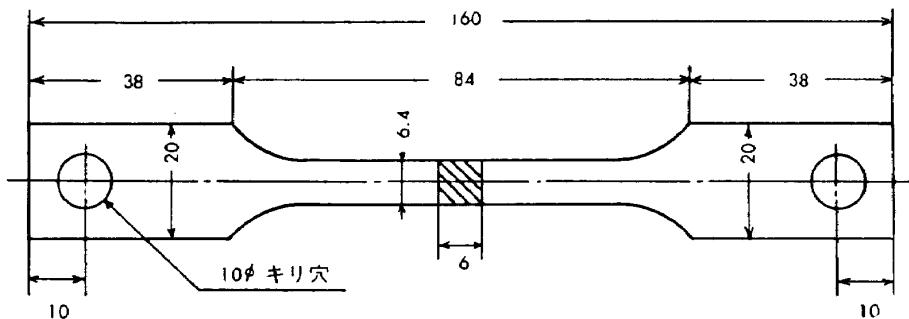
2. 実験に用いた材料

2-1 応力凍結用材料

応力凍結用に用いた材料は、理研計器製の光弾性用材料で、その厚みは 6 mm のものである。この材料の特性値は、次のとおりである。

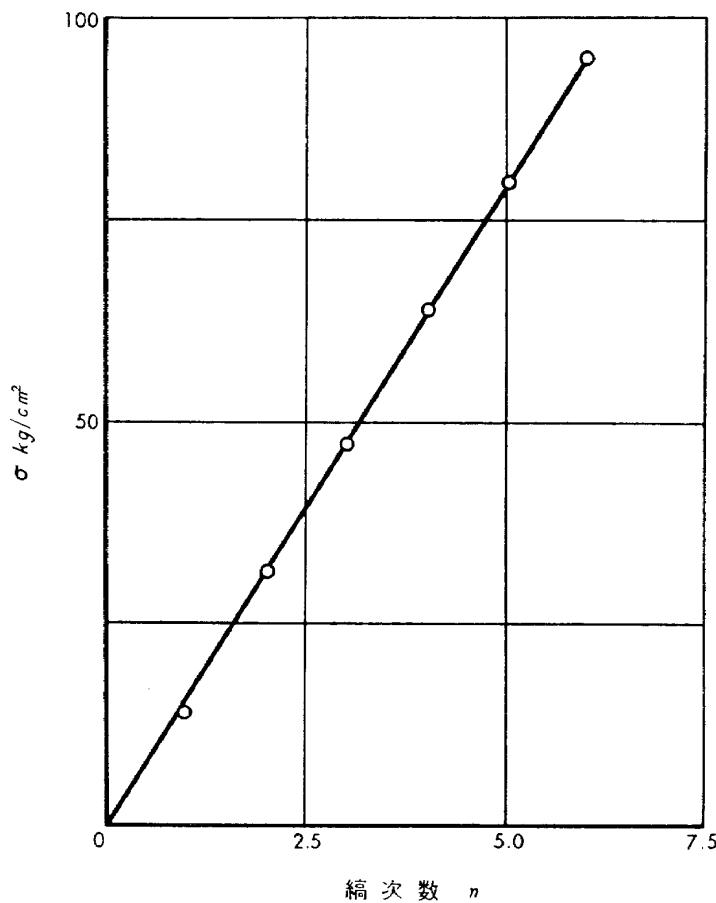
曲げ強さ	: 9~12 kg/mm ²
引張り強さ	: 6~8 kg/mm ²
ヤング率	: 300~400 kg/mm ²
ボアソン比	: 0.33
比重	: 1.2~1.3

光弾性材料として要求される性質のうちで最も大切なことは、応力と歪の間に比例的関係が保たれなければならないことである。このことを試験するために、この材料を用いて引張り試験を行なった。試験片の寸法は、第 1 図のとおりである。材料の焼鈍は、120°C 1 時間で行ない、その後常温まで 1 時間に 5°C の割合で徐冷したものである。引張りによる応力と縞次数との関係は、第 2



第 1 図

図に示すとおりである。この図において、横軸には縞次数をとり、縦軸には応力をとつてある。この結果から、応力と歪の間には、よい比例関係が成立していることがわかる。



第 2 図

2-2 光弹性皮膜用材料

この材料は、Epoxy-Polysulfide 系共重合体で、その成分は重量比で次のとおりである。

Epoxy prepolymer : 100

Diethylene triamine : 80

Polysulfide : x

Polysulfide は硬化剤で、この量 x によって、光弹性用皮膜材料の歪感度を変える。すなわち、この量が少ないと、材料の歪感度が大きくなり、歪の量が同じであっても多くの縞模様を出すことになる。ここで用いた材料は $x=30$ と $x=100$ の 2 種類である。

3. 試 験 機

本実験に用いた試験機は、理研計器製の次の三つのものである。

- i) 大口径光弹性実験装置

光 源 : 白色灯, 水銀灯

視野レンズ : 外径 300 mm

偏光子, 検光子 : 外径 300 mm

1/4 波長板 : 外径 300 mm

ii) 反射型光弾塑性実験装置 (型式 PA-7)

光 源 : 白色灯, 水銀灯

集光レンズ : 外径 140 mm

偏光子 : 外径 140 mm

1/4 波長板 : 外径 140 mm

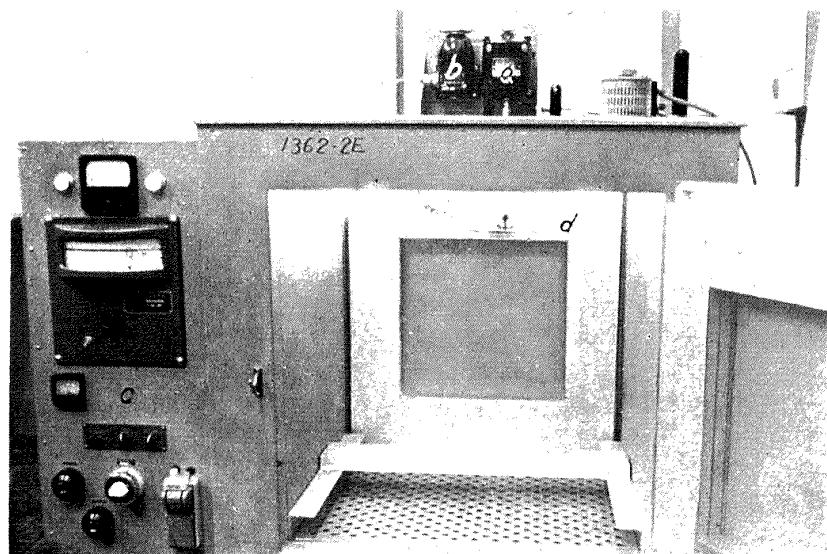
iii) 大型三次元光弾性実験装置 (応力凍結装置)

炉内容積 : $650 \times 650 \times 650 \text{ mm}^3$

温度範囲 : $30^\circ\text{C} \sim 150^\circ\text{C}$ (一点コントロール)

徐冷速度 : $5^\circ\text{C}/\text{時}, 3^\circ\text{C}/\text{時の二段切換}$

特にこの大型三次元光弾性実験装置は、回転試験ができるように改造したものである。第3図が

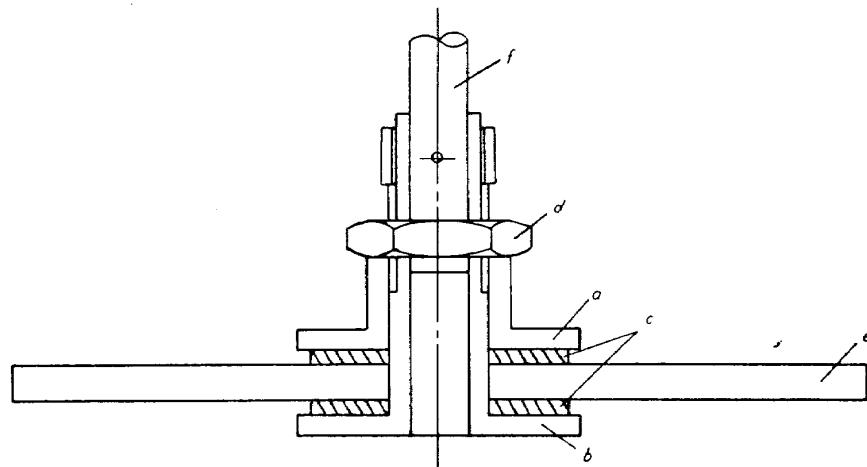


第 3 図

この装置の写真で、a が駆動モーター (出力 45W, 無段変速), b が回転計 (発電機式), c が制御板, d が試験円板で、駆動軸の直径は 10 mm である。また、この装置の最高回転数は、3,000 rpm である。

4. 駆 動 方 法

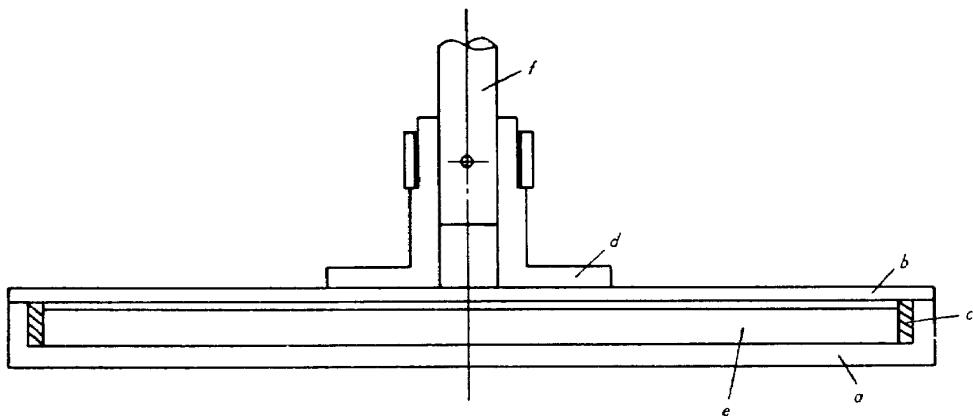
応力凍結装置の上部から垂直に出ている駆動軸に試験円板を次の方法で取り付けて実験を行なった。



第 4 図

第 1 の駆動方法は、第 4 図のとおりである。この図において、a, b は取付金具でこの中に試験円板 (e) を入れて、取付金具と試験円板との間には耐熱ゴム (c) をはさみ、これらをナット (d) で押え、駆動軸 (f) に接ぎ駆動した。その実験結果が第 6 図 (a) である。この図において、中心部に多数の等色線縞模様が出ている。しかし、それらは内径と同心円ではなく、やや長円になっている。このような試験円板を回転した時に現われる等色線縞模様は、内径と同心円に出るはずであるが、そのように出ないのは駆動方法が適していないものと思われる。

第 2 の駆動方法は、第 5 図のとおりである。この駆動方法は、試験円板 (e) を a のごとき中央

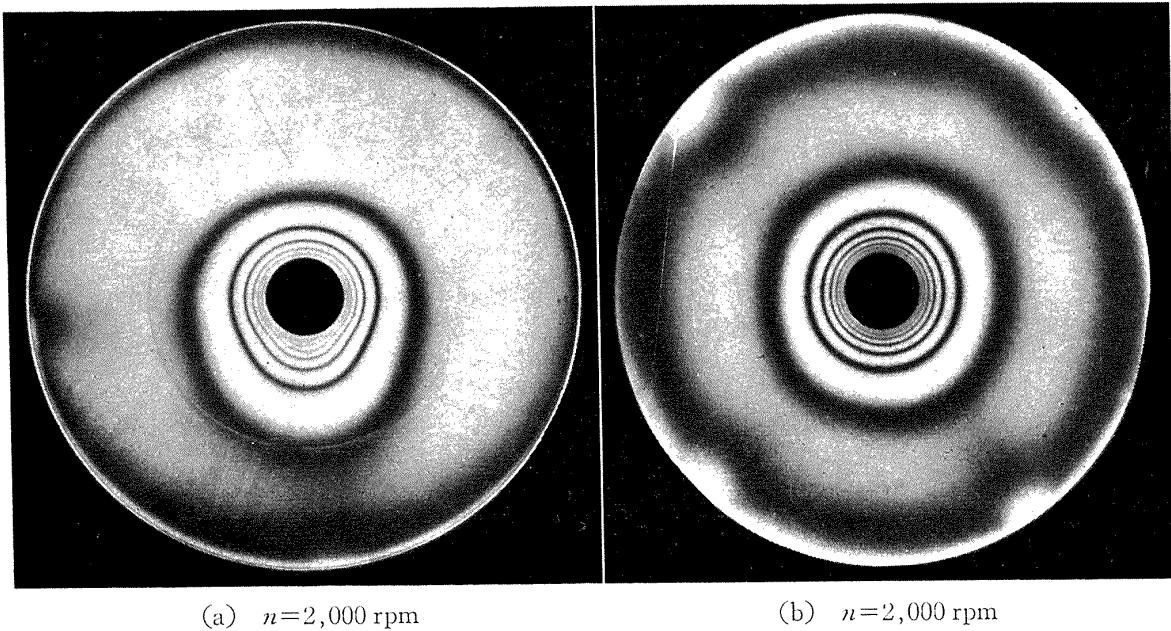


第 5 図

部がくぼんでいる皿の中にいれ、試験円板と皿の間には耐熱ゴム (c) を入れ、試験円板と皿とが直接あたらないようにした。また、試験円板がとび出さないように、皿の上部に蓋 (b) をして、皿と上蓋とは円周 4 カ所をビスで固定している。この上蓋に d のごとき取付金具をつけ、これを駆動軸 (f) に接ぎ駆動した。その実験結果が第 6 図 (b) である。これは第 6 図 (a) とは異なり、中心部の等色線縞模様が内径と同心円に出ている。これはこの駆動方法が適していることを示している。今後行なう実験はすべてこの駆動方法を用いた。

$$\begin{cases} 2r_0 = 145 \text{ mm} \\ 2r_1 = 20 \text{ mm} \end{cases}$$

暗視野



第 6 図

5. 実験方法

平面光弾性法では、試験片がある応力状態にあるときだけ、その応力における等色線縞模様が作り出され、応力がなくなってしまえばどのような縞模様も現われない。高速回転での試験円板の等色線縞模様も特殊な方法を用いれば、平面光弾性法でも不可能とは思われないが、ここでは試験円板の回転数を一定に保ち、その応力状態を凍結させて実験を行なった。

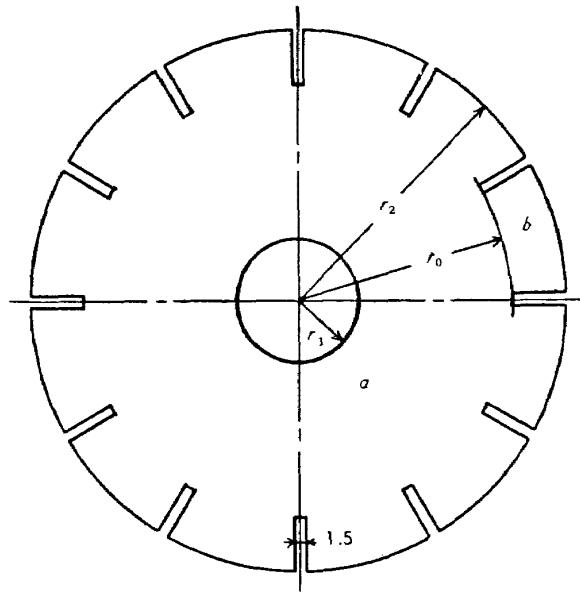
まず、光弾性材料で目的にかなった形状の試験円板を作り、これを第5図の駆動方法で回転させ、その回転を一定に保ったまま凍結装置内の温度を 120°C まであげ、この温度を2時間保ち、その後1時間 5°C の割合で常温まで下げ、温度が常温になったら回転を止めて、試験円板を取り出して等色線縞模様を観察した。

以上は、凍結法による実験方法であるが、皮膜法の場合はまず銅板で試験円板を作り、これに2-2で説明した光弾性皮膜を接着し、銅板で作った試験円板に合わせて皮膜を削り試験円板を作った。皮膜法の場合の回転数は凍結法に比べてはるかに高く、また、常温中で実験を行なうことができるので、以前に回転体の強度⁽¹⁾について実験した試験機を用いて実験を行なった。

なお、光弾性写真は、凍結法の場合は大口径光弾性実験装置を用い、皮膜法の場合には反射型光弾塑性実験装置を用いて行ない、フィルムは、白黒写真には NEOPAN-SS、天然色写真には FUJICOLOR-N50 を用いた。

6. 模型翼車の形状

本実験に用いた模型翼車の形状は第7図のとおりである。この図において、模型翼車の外半径を r_2 、内半径を r_1 、中心からスリットの切り込み部までの距離を r_0 で示している。なお、スリットの幅は 1.5 mm である。この模型翼車において、a の部分が実際の高速翼車の車盤に、b の部分が翼に相当させてある。



第 7 図

本実験に用いた模型翼車の寸法は第1表のとおりである。

第 1 表

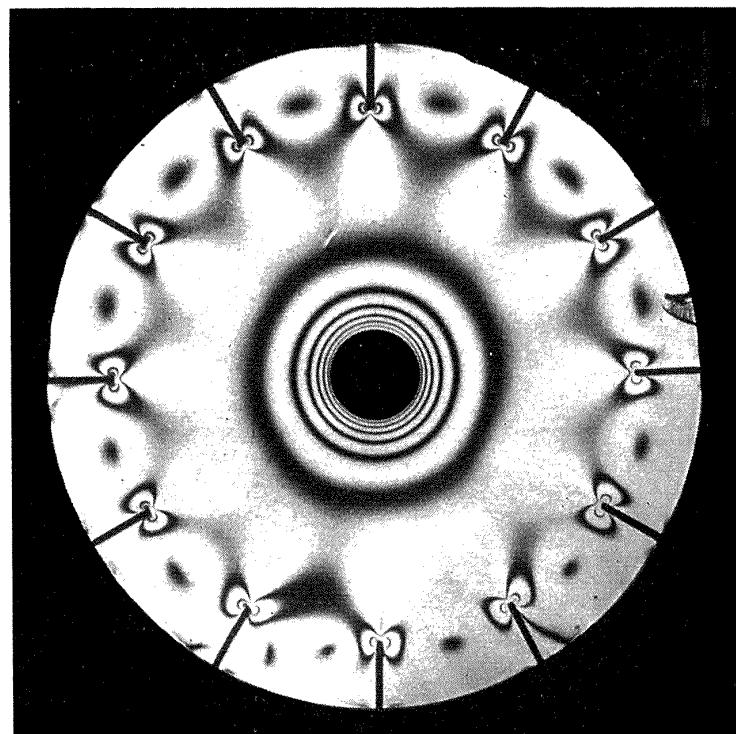
No	$2r_2$	$2r_0$	$2r_1$	備 考
11	145	145	20	凍結用模型翼車
12	150	120	20	"
13	145	115	20	"
14	145	115	70	"
15	150	120	0	"
16	150	120	2	"
21	165	100	20	皮膜用模型翼車 ($x=100$)
22	165	100	20	" ($x=100$)
23	165	100	20	" ($x=30$)

7. 実験と考察

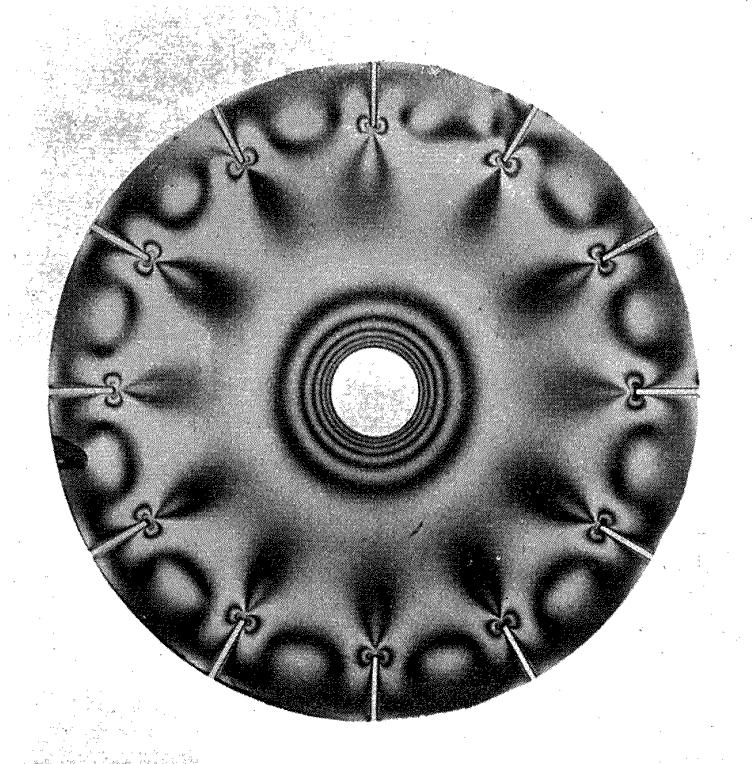
7-1 凍結法による実験

実際の翼車では、車盤の外周に多数の翼が取り付けてあり、翼の遠心力は車盤に対して外圧とし

$$\begin{cases} 2r_2 = 150 \text{ mm} \\ 2r_0 = 120 \text{ mm} \\ 2r_1 = 20 \text{ mm} \\ n = 1,900 \text{ rpm} \end{cases}$$



(a) 暗 視 野

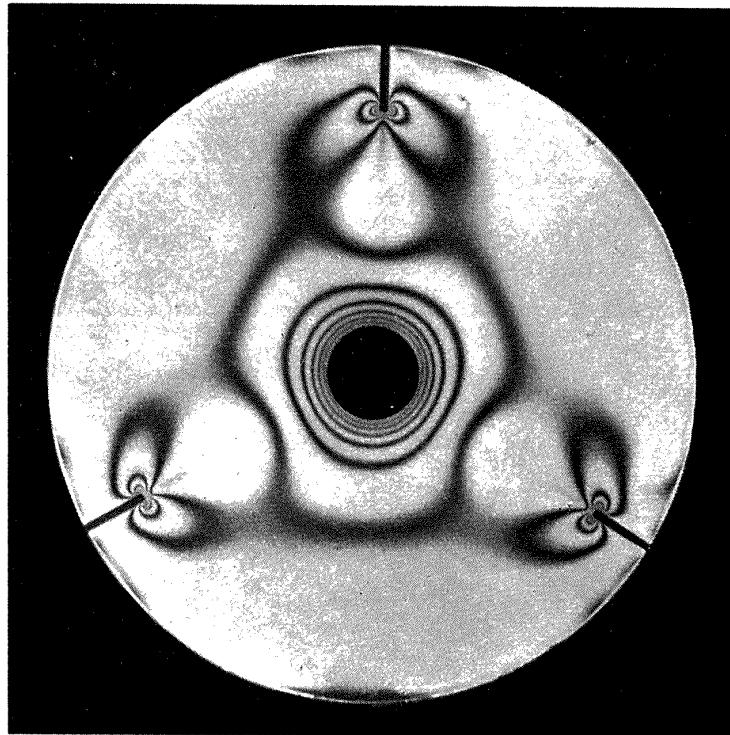


(b) 明 視 野

第 8 図

て作用しているものと思われる。そこで、模型翼車としていくつのスリットをその外周部に入れれば、翼の遠心力が車盤に対して外圧として働くかについて実験を行なった。実験に用いた模型翼車は、その外周部にスリットの数を 3 等分と 12 等分にいれたものである。その実験結果が第 8 図および第 9 図である。第 8 図の (a) および (b) は、それぞれ等色線縞模様を暗視野および明視野で観察したものであり、第 9 図は暗視野で観察したものである。ここに用いた模型翼車の寸法および回転数が同じであるので、ともに中心部に同次数の等色線縞模様が現われている。スリットを 12 等分に入れた模型翼車では、内径と同心円に等色線縞模様が現われているのに対して、スリットを

$$\begin{cases} 2r_2 = 145 \text{ mm} \\ 2r_0 = 115 \text{ mm} \\ 2r_1 = 20 \text{ mm} \\ n = 1,900 \text{ rpm} \end{cases}$$



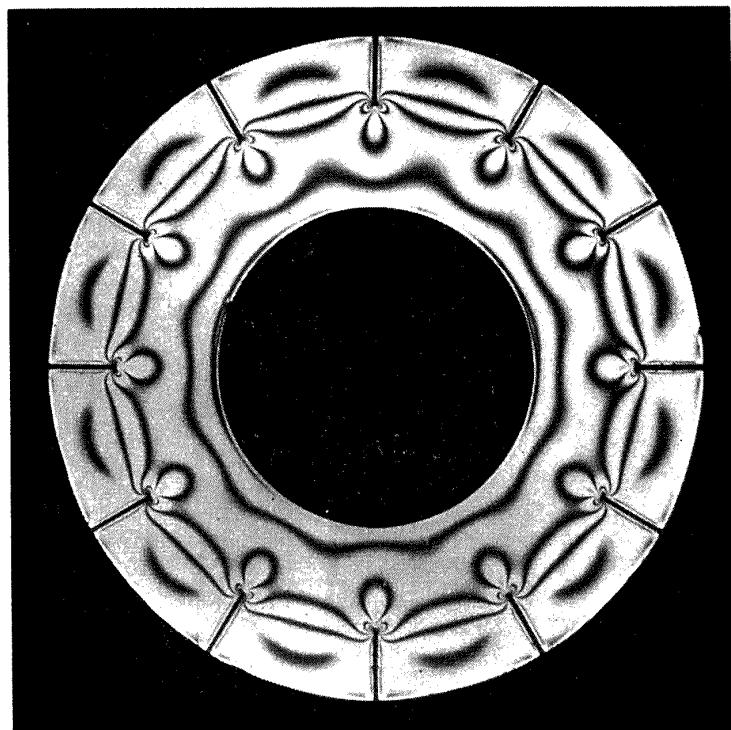
暗 視 野

第 9 図

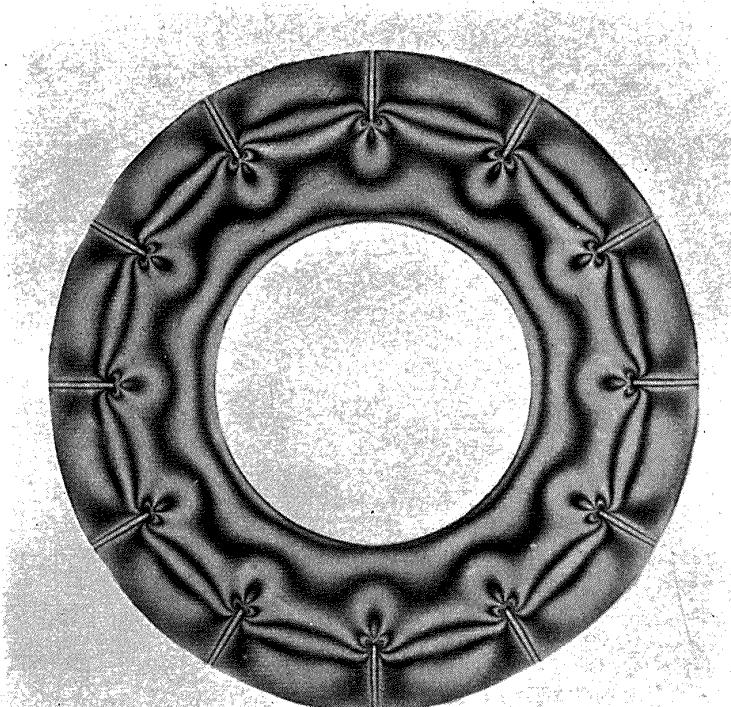
3 等分にいれた模型翼車では、縞次数の大きい等色線は内径とほぼ同心円に現われているが、縞次数が小さくなるにつれて等色線が同心円から三角形に近い縞模様に変っていっている。このことから、スリットの数を 12 等分にいれた場合は、翼の遠心力が車盤に対して外圧として働いているとほぼみなすことができる。しかし、スリットを 3 等分にいれた場合には、翼の遠心力が車盤に対して外圧として働いているとみることはできない。

しかし、このことも模型翼車の形状で変ることであり、模型翼車の外周部にスリットを 12 等分に入れれば、必ず翼の遠心力が車盤に対して外圧として働くと考えることはできない。第 10 図は

$$\begin{cases} 2r_2 = 145 \text{ mm} \\ 2r_0 = 115 \text{ mm} \\ 2r_1 = 70 \text{ mm} \\ n = 1,400 \text{ rpm} \end{cases}$$



(a) 暗 視 野

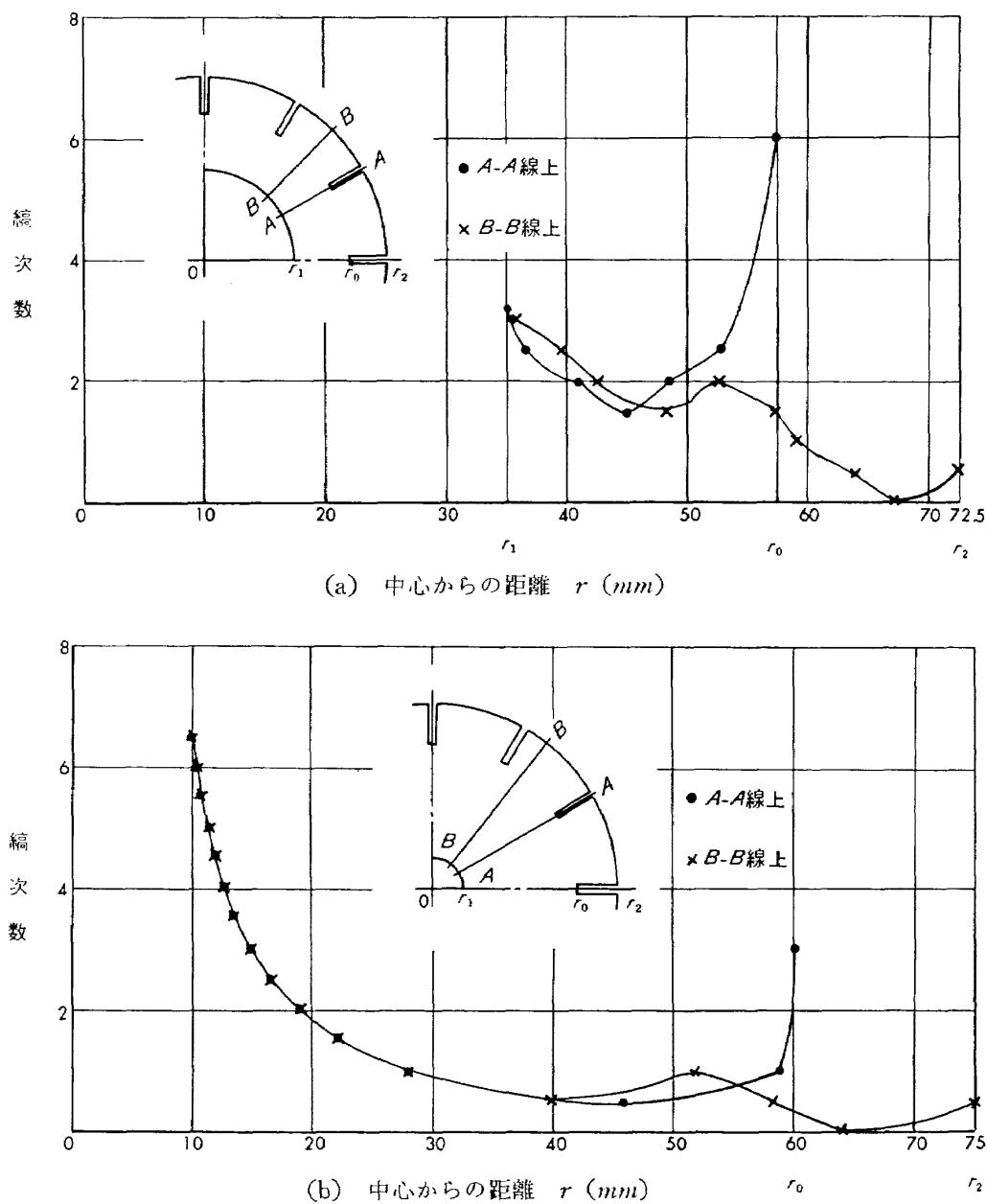


(b) 明 視 野

第 10 図

翼の長さは等しいが、内径を大きくした模型翼車の実験結果である。第 10 図の (a) および (b) は、それぞれ等色線縞模様を暗視野および明視野で観察したものである。この図において、内周部に等色線縞模様が現われているが、その現われ方は内径と同心円ではなく、12 角形の縞模様になっている。このように内径が大きい場合には、翼の遠心力が車盤に対して外圧として働いていないことがわかる。しかし、この場合でも、もっとスリットの数を増せば翼の遠心力が車盤に対して外圧として働くものとみなされるようになると思う。

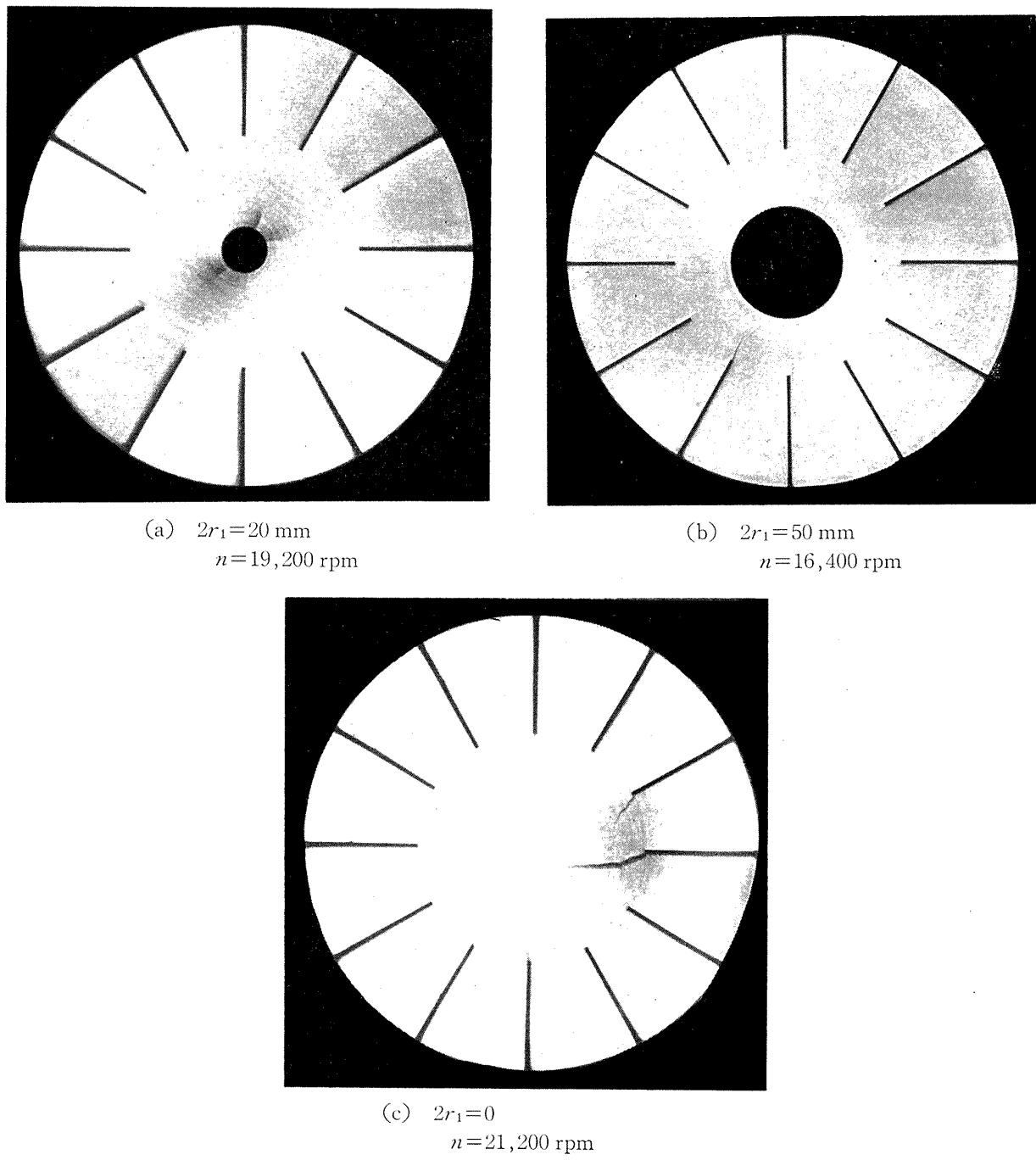
第 8 図および第 10 図で特に注意しなければならないことは、スリットの切り込み部における応力集中である。すなわち、これらの図において、それぞれスリットの切り込み部に多くの等色線縞



第 11 図

模様が現われているが、第8図においては、中心部の縞次数がスリットの切り込み部におけるものよりはるかに大きいのに対して、第10図においては、中心部の縞次数はスリットの切り込み部におけるものより小さく現われていることである。第11図は縞次数の変化を中心からの距離に対して画いたものであって、この図の(a)および(b)図はそれぞれ第8図および第10図に示した模型翼車についての関係である。等色線縞次数の変化は、暗視野だけでも観察することができるが、縞次数の変化の大きいところの観察には、明視野をも合わせて用いると、より正確に知ることができます。

$$\begin{cases} 2r_2 = 200 \text{ mm} \\ 2r_0 = 100 \text{ mm} \end{cases}$$



第12図

きる。その理由は、明視野の示す縞次数は暗視野の示す縞次数の中間の縞次数を示し、これにより暗視野で得られた2倍の等色線が得られるからである。第11図は暗視野と明視野の両方を用いて求めたものであり、この図において、●印はスリットの中心と模型翼車の中心を結んだ車盤の半径上における縞次数を示し、×印は2つのスリットの中間と模型翼車の中心を結んだ半径上における縞次数を示したものである。第11図の(a)および(b)図から次のことが観察される。

(a) 図においては、縞次数の変化が●印で示したものと×印で示したものとが、スリットの切り込み部の近傍をのぞいた車盤上ではよく一致している。しかし、(b)図では、●印で示したものと×印で示したものとは一致していない。このことは、第8図に示した翼車では、スリットの影響が車盤の応力分布にほとんど効いていないが、第10図に示した翼車では大きく効いていることを示している。

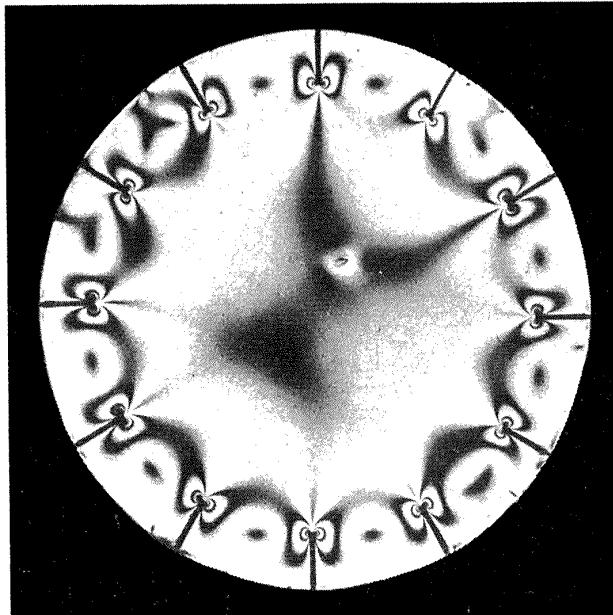
第12図は軟鋼の模型翼車の回転による降伏の写真である。この図において、円板の外径およびスリットの切り込み部までの距離は等しく、 $2r_2=200\text{ mm}$, $2r_0=100\text{ mm}$ であるが、内径が(a)では $2r_1=20\text{ mm}$, (b)では $2r_1=50\text{ mm}$, (c)では $2r_1=0$ となっている。そして(a)では降伏が円周から起こっており、(b)では降伏がスリットの切り込み部から起こっている。これは、内径が小さい翼車ではスリットの切り込み部における応力集中が車盤の応力分布にはあまり効かないが、内径が大きいときにはスリットの切り込み部における応力集中が車盤の応力分布に効くことを示しているのであって、このことは上で光弾性による縞次数の変化から観察したことと一致している。また、(c)のように中心部に穴がない場合は、その応力分布がゆるやかであるので、やはりスリットの影響が大きく、スリットの切り込み部から降伏が起こっている。

次に、模型翼車の中心に穴がない場合および小さい穴がある場合の等色線縞模様を、暗視野および明視野によって観察した結果について示す。第13図および第14図はいずれも外径およびスリットの切り込み部までの距離が等しく、第13図は中心に穴がない模型翼車、第14図は内径 $2r_1=2\text{ mm}$ の模型翼車についての実験結果である。中心に穴がない場合は半径応力も円周応力もその分布がゆるやかであるとともに、中心においては両方の応力が等しい。したがって、中心部に0次の等色線縞模様が現われている。中心に小さい穴がある場合に多数の等色線縞模様がそこに現われているのは、中心部における応力分布が急であるためである。

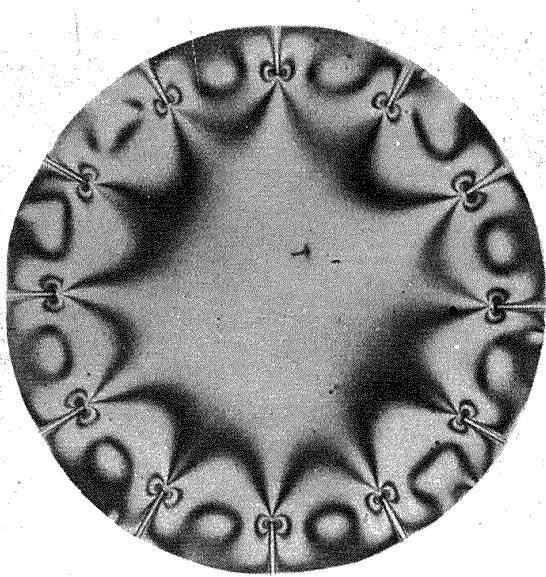
これまで、一つの模型翼車のある回転数における等色線縞模様について、実験を行なってきたが、今度は、一つの模型翼車についての等色線縞模様と回転数の関係について実験を行なった。第15図が暗視野により観察した実験結果である。当然のことであるが、回転数を上げるにしたがい主応力差が大きくなるので、模型翼車の縞模様は増して次数が大きくなっている。

今まで、模型翼車に現われる等色線縞模様を白黒写真で観察してきた。しかし、これを天然色写真で観察すると次数の異なった多くの等色線が得られるので、その観察が正確にできる。第16

$$\begin{cases} 2r_2=150 \text{ mm} \\ 2r_0=120 \text{ mm} \\ 2r_1=0 \\ n=2,100 \text{ rpm} \end{cases}$$



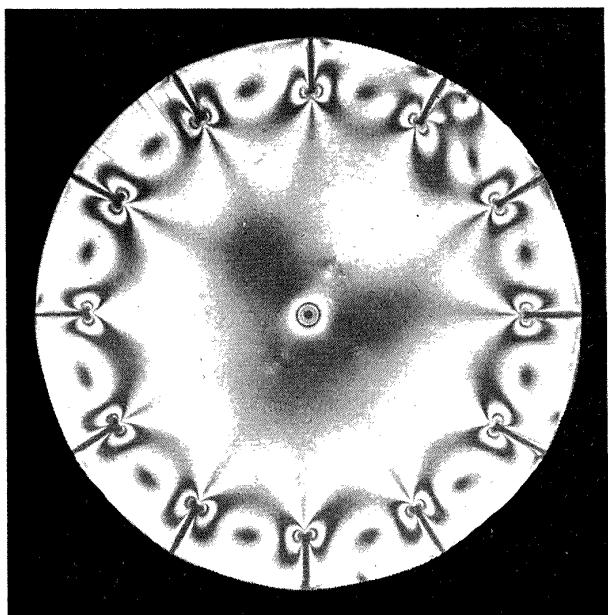
(a) 暗 視 野



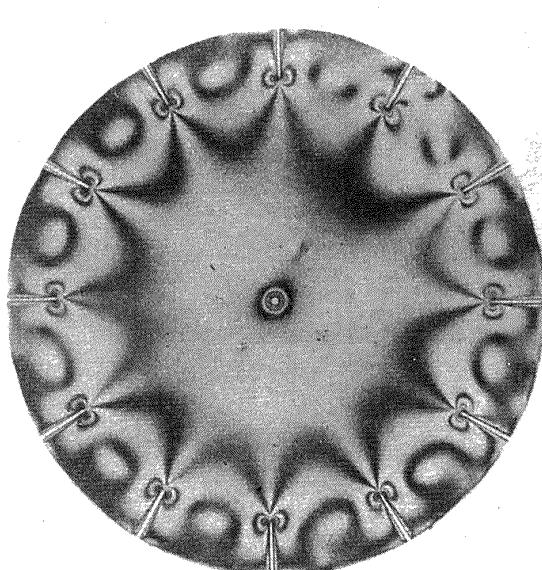
(b) 明 視 野

第 13 図

$$\begin{cases} 2r_2=150 \text{ mm} \\ 2r_0=120 \text{ mm} \\ 2r_1=2 \text{ mm} \\ n=2,100 \text{ rpm} \end{cases}$$



(a) 暗 視 野

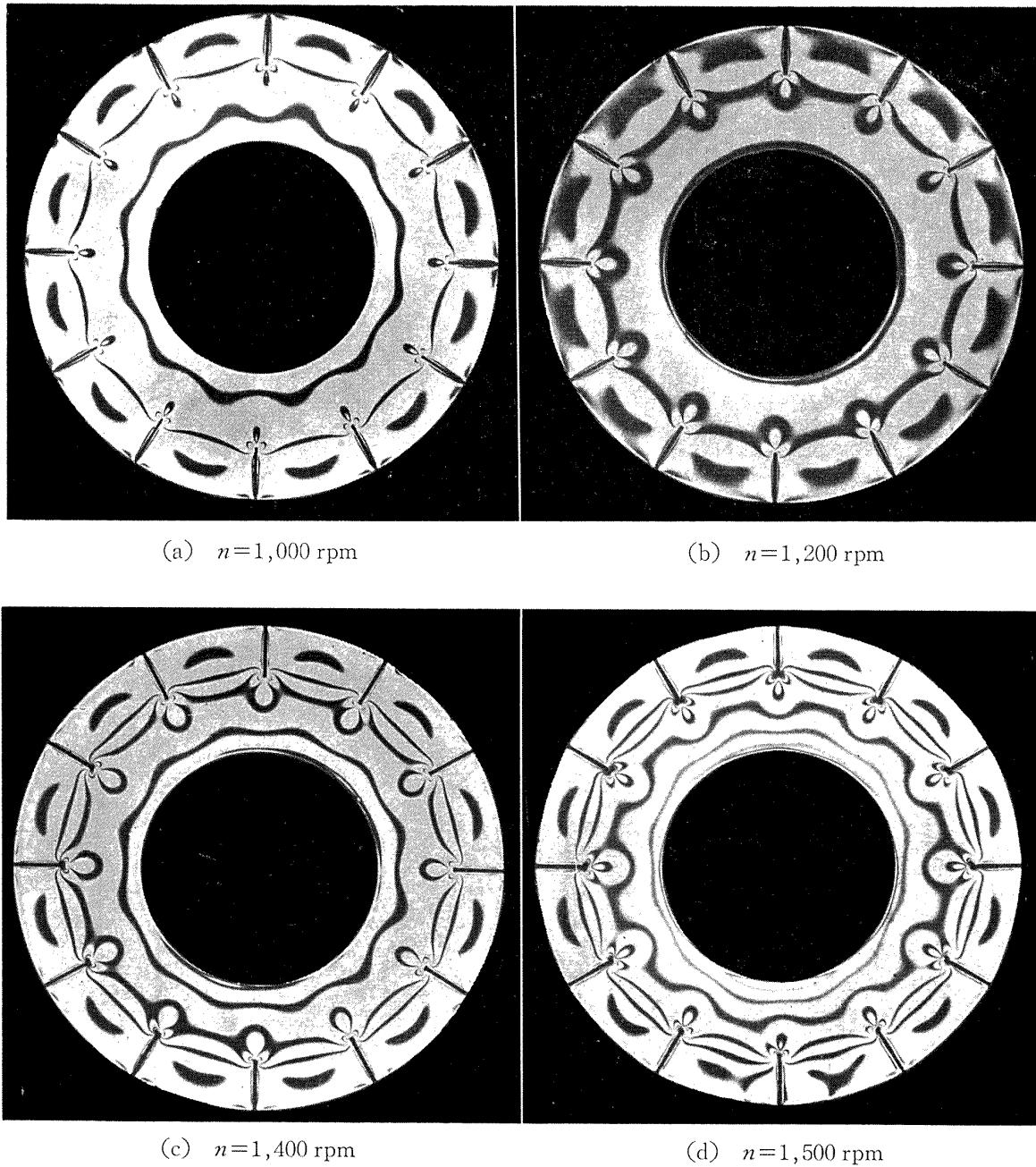


(b) 明 視 野

第 14 図

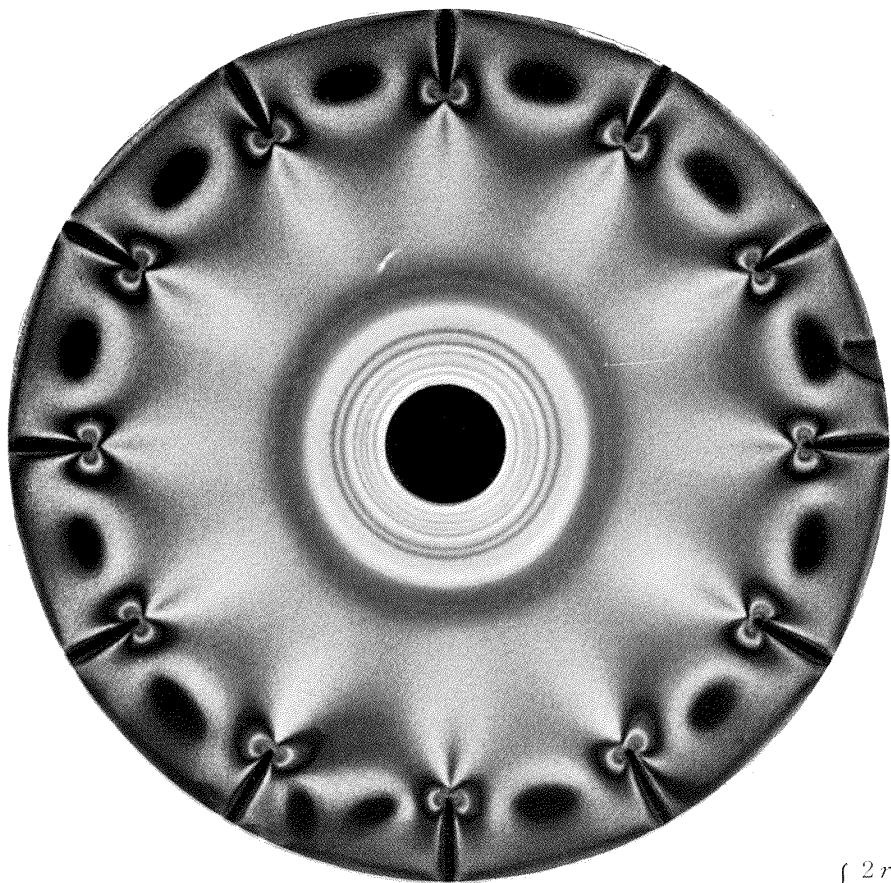
$$\begin{cases} 2r_2 = 145 \text{ mm} \\ 2r_0 = 115 \text{ mm} \\ 2r_1 = 70 \text{ mm} \end{cases}$$

暗 視 野



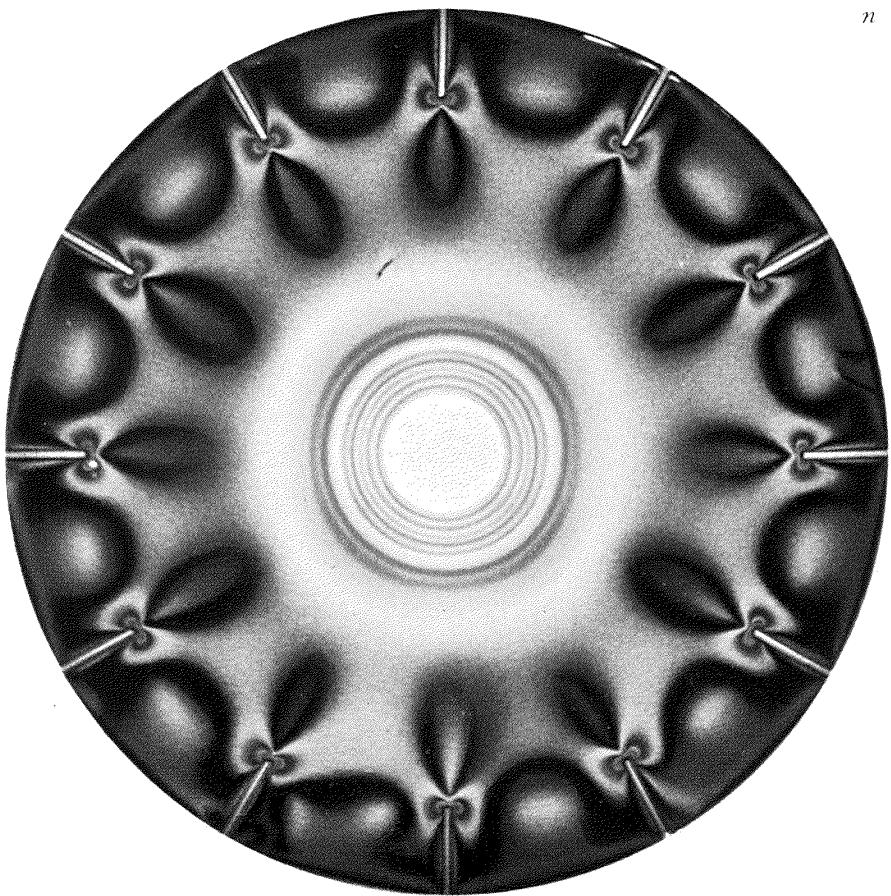
第 15 図

図は外径 $2r_2=150$ mm, 内径 $2r_1=20$ mm の円板の外周に $2r_0=120$ mm までスリットを 12 等分にいれた模型翼車の暗視野および明視野における等色線縞模様を天然色写真で示したものである。この図における等色線縞模様のうちで、黄色、赤色および緑色の等色線縞模様が、それぞれ $1/3$ 次、 $2/3$ 次および 1 次の縞次数を示すので、これらの縞次数を用いることにより、なお一層等色線縞模様の観察を正確に行なうことができるようになる。また、白黒写真に現われる黒色の等色線は、天



(a) 暗 視 野

$$\left\{ \begin{array}{l} 2r_2 = 150 \text{ mm} \\ 2r_0 = 120 \text{ mm} \\ 2r_1 = 20 \text{ mm} \\ n = 1,900 \text{ rpm} \end{array} \right.$$



(b) 明 視 野

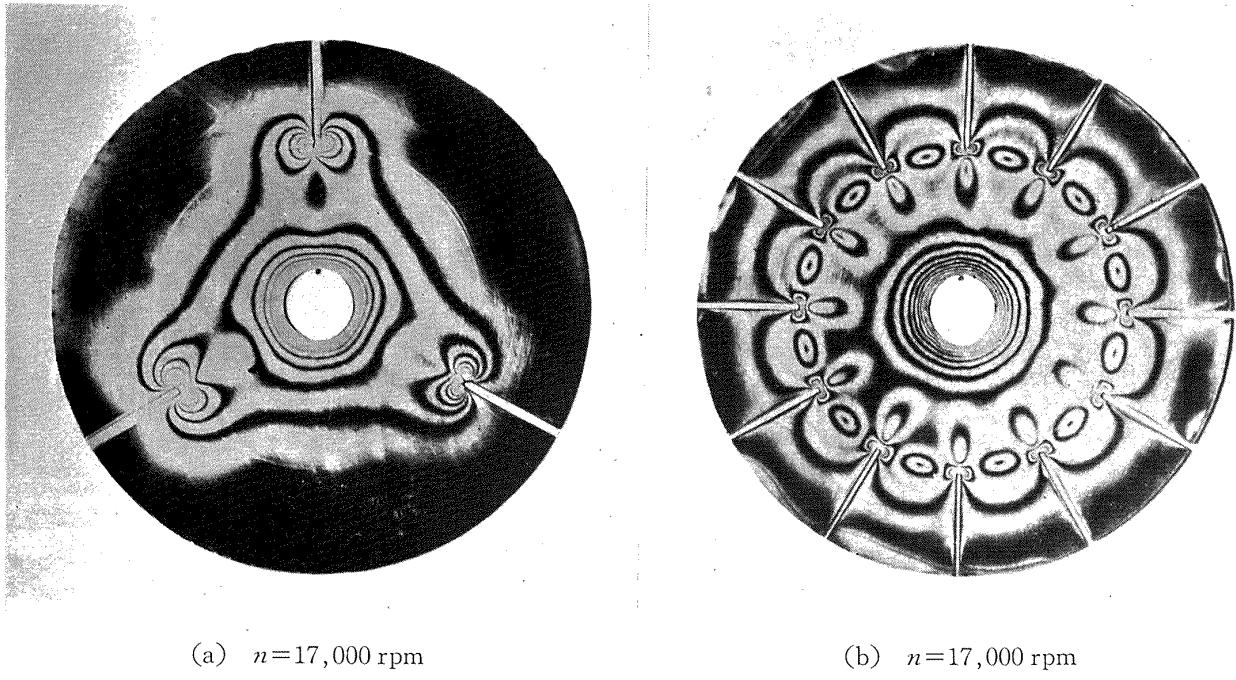
第 16 図

第 16 図 応力凍結法による模型翼車の天然色写真

(a) 図は暗視野、(b) 図は明視野における等色線を撮影したものである。(a) 図と (b) 図における同色の等色線の綺次数の間には、 $1/2$ 次のずれがあり、これらの等色線を用いて応力の解析をすれば、白黒写真を用いた場合より一層正確に行なうことができる。

然色写真の緑色の等色線を示すものである。

$$\begin{cases} 2r_2 = 165 \text{ mm} \\ 2r_0 = 100 \text{ mm} \\ 2r_1 = 20 \text{ mm} \end{cases}$$



第 17 図

7-2 皮膜法による実験

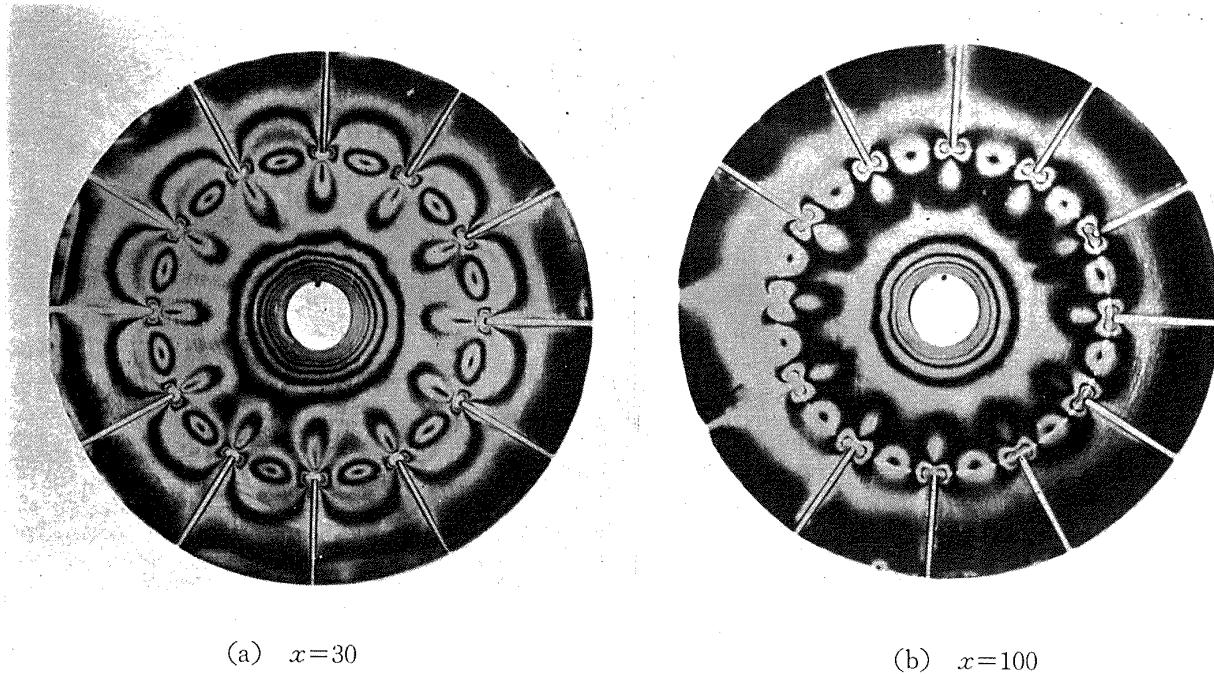
皮膜法に用いた模型翼車は、2 mm の銅板から作ったもので、これに 2 mm の光弾性皮膜を接着したものである。

皮膜法で生ずる等色線縞模様は、模型翼車の塑性歪と同じ量だけ光弾性皮膜が弾性歪をうけ、これにより生ずる光弾性効果を反射型光弾塑性実験装置により求めたものである。

実験に用いた模型翼車の寸法はいずれも同じで、その外周部にスリットを 3 等分および 12 等分にいれたものである。第 17 図がその実験結果であるが、翼の遠心力が車盤に及ぼす影響に関しては、前に凍結法で求めた実験結果とほぼ同じもののように観察される。

次に、光弾性皮膜の歪度について実験を行なった。第 18 図がその実験結果で、(a) が歪度 $x=30$ 、(b) が歪度 $x=100$ の皮膜を模型翼車に接着したものである。この実験において、実験に用いた模型翼車の寸法は同じであり、しかも試験回転数が等しいので、いずれの模型翼車内にも同じ量の塑性歪が生じているわけであるが、それにもかかわらず中心部に現われている等色線縞次数は、 $x=30$ の方が $x=100$ よりはるかに高い。これは光弾性皮膜の歪度によるものと思われる。よって、光弾性皮膜を試験片に接着する場合は、試験翼車の材質ならびに実験目的によって、適当な歪度をもった皮膜を選ぶことが肝心であると思う。

$$\begin{cases} 2r_2=165 \text{ mm} \\ 2r_0=100 \text{ mm} \\ 2r_1= 20 \text{ mm} \end{cases}$$



第 18 図

8. 結 び

光弾性材料を用いて、模型翼車に現われる等色線縞模様をいろいろ観察した。そして、円板の外周にスリットを入れただけの模型翼車でも、車盤の内外径比が小さい場合にはスリットの数を適当に入れれば、実際の翼車におけると同様に翼の遠心力が車盤に対して外圧として働くことがわかった。このことは、光弾性あるいは光塑性による縞模様の観察から実際の翼車における応力分布を調べるときに大切なことであると思う。

終りに、終始御指導と御討論を賜った佐藤和郎先生に深く感謝の意を表する次第である。また、光弾性皮膜の製作並びにその接着をして下さった三菱長崎造船所の柳下小太郎氏に厚くお礼を申し上げるとともに、実験を手伝ってくれた太田泰正君、神保勝久君並びに渡辺一郎君にも感謝の意を表する次第である。

文 献

- (1) 佐藤・永井, “回転円板の強度” 航空技術研究所報告 TR-4 (1960).

I. 永井 文雄	NAL TM-11
II. NAL TM-11	航空技術研究所
III. 539.4.012 621-25	光弾性による高速車盤の縮模様

1963 年 2 月 17 ページ

ガスター・ビン・軸流圧縮機のような高速翼車の車盤内の応力状態を光弾性材料を用いて模型翼車を作り、光弾性による縮模様から観察した。そして、円板の外周にスリットを入れた翼車でも、車盤の内外径比が小さい場合には、スリットの数を適当に入れれば、実際の翼車におけると同様に翼の遠心力が車盤に対して外圧として働くことがわかった。

なお、縮模様の観察は、応力凍結法と皮膜法の二つの方法によつて行なっている。

1963 年 2 月 17 ページ

ガスター・ビン・軸流圧縮機のような高速翼車の車盤内の応力状態を光弾性材料を用いて模型翼車を作り、光弾性による縮模様から観察した。そして、円板の外周にスリットを入れた翼車でも、車盤の内外径比が小さい場合には、スリットの数を適当に入れれば、実際の翼車におけると同様に翼の遠心力が車盤に対して外圧として働くことがわかった。

なお、縮模様の観察は、応力凍結法と皮膜法の二つの方法によつて行なっている。

I. 永井 文雄	NAL TM-11
II. NAL TM-11	航空技術研究所
III. 539.4.012 621-25	光弾性による高速車盤の縮模様

1963 年 2 月 17 ページ

ガスター・ビン・軸流圧縮機のような高速翼車の車盤内の応力状態を光弾性材料を用いて模型翼車を作り、光弾性による縮模様から観察した。そして、円板の外周にスリットを入れた翼車でも、車盤の内外径比が小さい場合には、スリットの数を適当に入れれば、実際の翼車におけると同様に翼の遠心力が車盤に対して外圧として働くことがわかった。

なお、縮模様の観察は、応力凍結法と皮膜法の二つの方法によつて行なっている。

ガスター・ビン・軸流圧縮機のような高速翼車の車盤内の応力状態を光弾性材料を用いて模型翼車を作り、光弾性による縮模様から観察した。そして、円板の外周にスリットを入れた翼車でも、車盤の内外径比が小さい場合には、スリットの数を適当に入れれば、実際の翼車におけると同様に翼の遠心力が車盤に対して外圧として働くことがわかった。

なお、縮模様の観察は、応力凍結法と皮膜法の二つの方法によつて行なっている。

既 刊 資 料

TM-1 高マッハ数風洞について（I）	1961年11月 平木一, 清水福寿 橋本登
TM-2 航空技術研究所計数型電子計算機設備 プログラムライブラー I	1962年2月 橋口一雄, 戸川隼人 三好甫, 高橋利之 能美力, 板垣芳雄 鳥海良三, 佐藤保子
TM-4 18 cm×20 cm超音速風洞について	1962年5月 長洲秀夫, 伝田幸雄
TM-5 遷音速流の線型理論	1962年8月 細川巖
TM-6 18 cm×18 cm 遷音速風洞整備試験	1962年8月 橋本登, 井上政一
TM-7 慣性力形疲労試験機	1962年8月 竹内和之, 山根皓三郎
TM-8 アルミ合金の前歴が疲れ寿命に およぼす実験的研究	1962年9月 池田為治, 坂元思無邪
TM-9 方向性次元解析と相似解に関する覚書	1963年2月 甲藤好郎, 小出勉
TM-10 DATATRON 205 用 ALGOL 58 使用法について	1963年2月 高橋利之

注： 欠番は配布先を限定したもの。

航空技術研究所資料 11号

昭和38年2月 発行

発 行 所 航 空 技 術 研 究 所
東京都三鷹市新川700
電話武藏野(0422)35171(代表)

印 刷 所 笠 井 出 版 印 刷 社
東京都港区芝南佐久間町1の53

Printed in Japan

This document is provided by JAXA.