

航空宇宙技術研究所報告

TECHNICAL REPORT OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TR-55

ボスをもった車盤の回転強度

佐藤和郎・永井文雄

1963年11月

航空宇宙技術研究所

NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

既 刊 報 告

TR-23	いくつかの型の偏微分方程式の境界値問題の モンテカルロ法による解法とその実験 Monte Carlo Solutions of the Boundary Value Problems for Some Types of Partial Differential Equations	1962年2月	樋口一雄, 高橋利之 鳥海良三
TR-24	航空技術研究所のターボ・ジェットエンジン 要素試験設備 Test Facilities of Turbo-jet Engine Components at N.A.L.	1962年2月	航空技術研究所原動機部
TR-25	航空技術研究所 2m×2m 遷音速風洞の 計画と構造 Design and Construction of the National Aeronautical Laboratory 2m×2m Transonic Wind Tunnel	1962年3月	航空技術研究所
TR-26	吹出式超音速風洞のノズルの予備実験 Preliminary Tests of Supersonic Nozzles for the Supersonic Blowdown Wind Tunnel	1962年3月	河崎俊夫, 岡部祐二郎 尾形吉和, 安藤 尚
TR-27	非定常遷音速流の近似解析 An Approximate Analysis for Unsteady Transonic Flow	1962年7月	細川 巖, 三好 甫
TR-9T	Studies on the Small Disturbance Theory of Transonic Flow (I) —Nonlinear Correction Theory—	July 1962	Iwao Hosokawa
TR-28	疲労亀裂について On Fatigue Cracks	1962年8月	竹中幸彦
TR-29	1m×1m 吹出式超音速風洞の計画と構造 On the Design and Construction of the 1m×1m Supersonic Blow-down Wind Tunnel	1962年10月	空気力学第二部
TR-30	平板翼の振動について On the Natural Vibration of Plate-Like Wings	1962年11月	川井忠彦, 埴 武敏 戸川隼人, 高橋利之 越出慎一
TR-31	熱応力を受ける薄翼の安定とその 微小振り振動について On the Instability and Small Natural Torsional Vibration of a Thin Wing under a Thermal Stress	1962年11月	川井忠彦, 林 洋一 戸川隼人
TR-32	補強板の圧縮強度に関する一解析 A Method of Analysis on the Compressive Strength of Stiffened Plates	1962年11月	川井忠彦, 江川幸一
TR-33	主翼繰返し荷重試験装置 Repeated Load Testing Rigs for Full Scale Aircraft Wing Structures	1962年12月	竹内和之, 飯田宗四郎 小野幸一
TR-34	高速軸流圧縮機の研究 (I) —翼型と翼列の検討— An Investigation of High Speed Axial Flow Compressor (I) —The Selection of Compressor Cascade—	1963年1月	松木正勝, 大山耕一 宮地敏雄
TR-35	高速軸流圧縮機の研究 (II) —単段試験装置の設計と全体性能— An Investigation of High Speed Axial Flow Compressor (II) —Design and Over-all Performance of a Single Stage Axial Flow Compressor—	1963年1月	松木正勝, 宮地敏雄 大山耕一, 吉田 晃 西脇英夫, 岩部柱相
TR-36	衝撃波風洞による表面熱伝達の実験 Studies of Surface Heat Transfer Using a Hypersonic Shock Tunnel	1963年1月	和田 勇, 松崎利一
TR-37T	Studies of the Flow in a Low Pressure Hypersonic Shock Tunnel Using an Electron-Densitometer	January 1963	Isamu Wada
TR-38	鋳鉄のような脆性材料からなる円板の 回転強度 Strength of Rotating Discs of Brittle Material like Cast Iron	1963年2月	佐藤和郎, 永井文雄
TR-39	高負荷燃焼器の研究 (第1報) —その性能におよぼす各種因子の 影響の定性的考察— A Study of High Intensity Combustor (I) —Its Qualitative Analysis—	1963年2月	大塚貞吉, 鈴木邦郎

ボスをもつた車盤の回転強度

佐藤 和郎** ・ 永井 文雄**

Rotating Strength of Rotor Which Has a Boss.

By Yasuo SATO and Fumio NAGAI

In order to make clear the influence of a boss upon the rotating strength of a high speed rotor as in an axial-blower, the bursting tests were carried out by using the model of the rotor which has a boss as shown in Fig. 3.

According to the tests, there are two modes in the bursting of the rotor and they depend on the ratio $\gamma_b = r_b/r_0$, as shown in Fig. 4; one is the burst on the diametral section and the other is that on the circular section along the boss. Fig. 6 shows the experimental relation between the bursting speed v and the ratio γ_b .

The authors discussed an effect of a boss on the distributions of stresses in the rotor, and proposed the conditions when the rotor bursts on the diametral section and on the circular section along the boss. These conditions agreed very well with the experiments.

諸 言

機械の設計において構造を軽量化するということは常に要求されることである。このためには、材料の選定が必要になってくる。しかし、材料が同じでも構造物の強度は形によって異なるので、形と強度の関係についても知る必要がある。

ガスタービンや軸流圧縮機などの高速翼車における車盤の中で形が最も単純なものは円板であって、回転円板の強度の研究は広く行なわれている。われわれのところでも車盤の形と強度の関係、すなわち、応力分布と強度の関係を知る目的で内外径比を変えた円板について回転強度の研究をしてきた。その主な研究は、軟鋼円板の降伏⁽¹⁾⁽²⁾、延性材料ならびに脆性材料からなる回転円板の破壊強度⁽¹⁾⁽³⁾などについてである。

実際の翼車における車盤では、強度の関係から中心部の肉厚は外周部におけるものよりも厚くな

* 昭和 38 年 9 月 26 日受付

** 原動機部

っているものが多い。この報告では、中心部にボスをもった車盤の回転強度について実験ならびに考察を行ない、ボスが車盤の強度に及ぼす影響を明らかにしたものである。

実験に使用した材料

試験用車盤はすべて一枚のアルミニウムの板から削り出したものである。車盤は機械加工した後、加工の影響をのぞくために電気炉で 300°C で 1 時間保持して焼どんを行ない、後は炉中で冷却をした。

材料の性質を調べるために円板の回転による破壊試験を行なってみた。第 1 表は内径 $2r_1=20\text{ mm}$ 、外径 $2r_0=160\text{ mm}$ の円板が破壊したときの回転数 $n\text{ r.p.m.}$ を示したものであり、第 1 図は破壊

第 1 表

$2r_1$ mm	$2r_0$ mm	$\gamma_1 = \frac{r_1}{r_0}$	n r.p.m.	v_0 m/sec
20	160	0.125	38,000	318
20	160	0.125	39,000	327
20	160	0.125	38,000	318

平均 $v_0=321$

した円板の一例を示したものである。アルミニウムのような延性材料からなる円板の破壊の条件はすでによくわかっていて、次の (1) で表わされる⁽⁴⁾。

$$\bar{\sigma} = \sigma_B' \quad (1)$$

ただし、 $\bar{\sigma}$ は円板の初めの寸法をもとにして表わした円周応力の平均値、

σ_B' は円輪の回転強度。

したがって、内外径比が γ_1 である円板が破壊するときの円板の周速度 v_0 と σ_B' の関係は

$$\frac{1}{3} \rho v_0^2 = \frac{\sigma_B'}{1 + \gamma_1 + \gamma_1^2} \quad (1')$$

ただし、 ρ は材料の密度

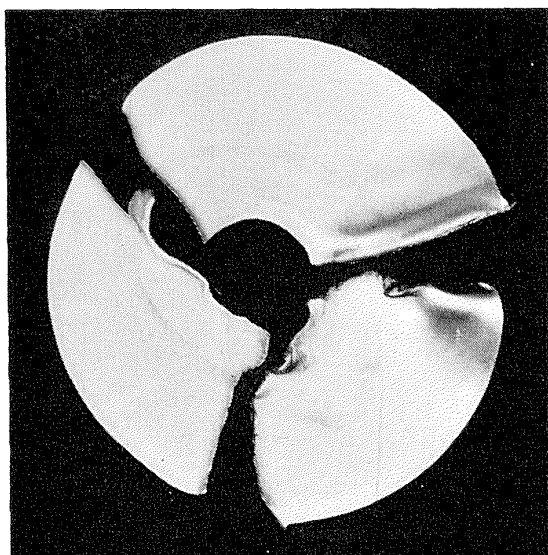
第 1 表に示した円板の実験結果に (1)' を適用して、 σ_B' を求めてみると

$$\sigma_B' = 10.8 \text{ kg/mm}^2.$$

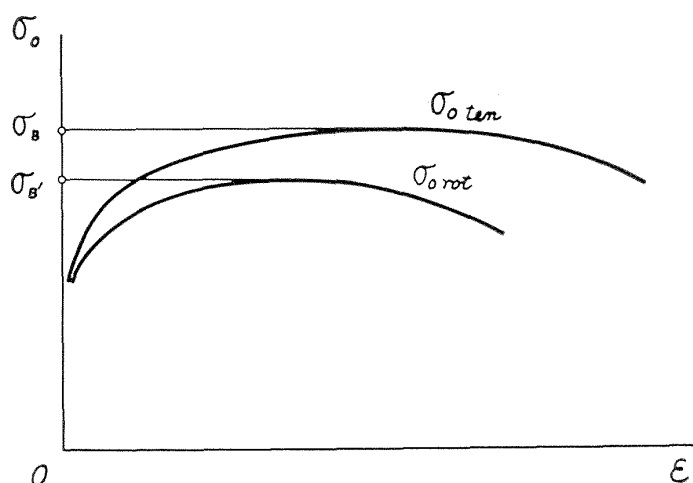
となる。

回転による円輪の応力状態は円周方向への均等引張りであって、変形は断面積が減っただけ円周方向に伸びて直径は拡がる。したがって、真応力 σ は断面積が減少したことと、直径の拡がりによる遠心力の増加したことの二重の影響を受ける。したがって、真応力 σ と呼称応力 σ_{rot} との関係は円輪の伸び歪みを ε とすれば

$$\sigma = \sigma_{\text{rot}}(1 + \varepsilon)^2$$



第 1 図



第 2 図

引張りにおける真応力 σ と呼称応力 σ_{0ten} の関係は、伸び歪みを ε とすれば

$$\sigma = \sigma_{0ten}(1 + \varepsilon)$$

σ_{0rot} と σ_{0ten} の関係は

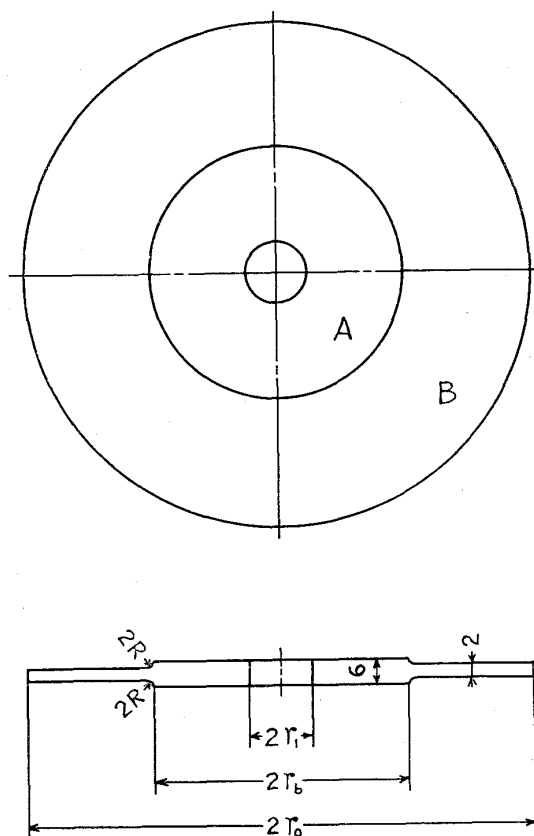
$$\sigma_{0rot} = \frac{\sigma_{0ten}}{1 + \varepsilon}$$

したがって、円輪の回転による $\sigma_{0rot} \sim \varepsilon$ の関係ならびに強度 $\sigma_{B'}$ は引張りによる $\sigma_{0ten} \sim \varepsilon$ の関係が第2図のようにわかっていれば、これに上の関係を適用して知ることができる。第2図において、 σ_{0ten} の最大値 σ_B は材料の抗張力であり、 σ_{0rot} の最大値 $\sigma_{B'}$ が円輪の強度である。円輪は応力が $\sigma_{B'}$ に達するまでは回転を増さなければ変形をしないが、 $\sigma_{B'}$ に進んだ以後は回転を増さなくても局部収縮を生じて破壊を起こす。

実験-1 および考察

実験-1 第3図は実験に使用したボスをもった車盤の形を示したものである。この実験では、ボスが車盤の破壊強度に及ぼす影響をみるのが目的であって、このために車盤の寸法はボス径 $2r_b$ のみを変えて、その他の寸法は一定にした。第2表は実験に使用した車盤の寸法を示したものであって、 t はボスの厚さ (6 mm) と車盤の厚さ (2 mm) との比、 γ_i は車盤の内径と外径との比である。

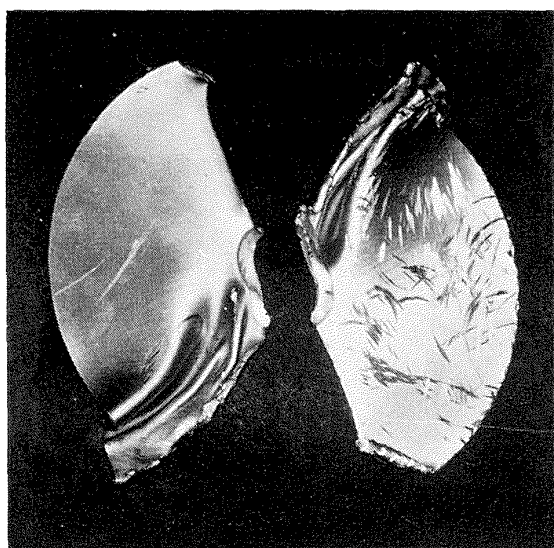
実験はこれらの車盤についてスピントストを行ない破壊するときの回転数 n を測定した。第4図は破壊した車盤の破片を集めて、破壊の仕方を示したものである。破壊は γ_b の値、すなわちボスの付け方によって異なっていて、破壊が車盤の中心を通る横断面 (diametral section) で起きているもの、ボスは健在に残っているがボスの周りで破壊しているもの、また、これらの破壊が同時に起きているもの、三種類あることが認められる。図ならびに第2表には、これらの三種類の破壊の仕方について、それぞれ ○, ●, ⊙ の記号で記入しておいた。



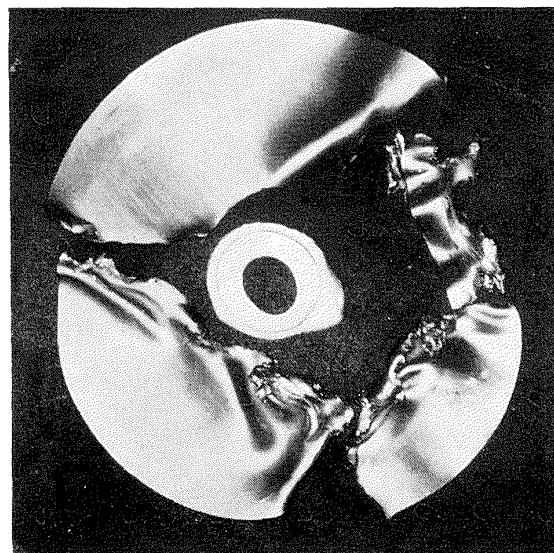
第 3 図

第 2 表 ($\gamma_1=0.1025$, $t=3$)

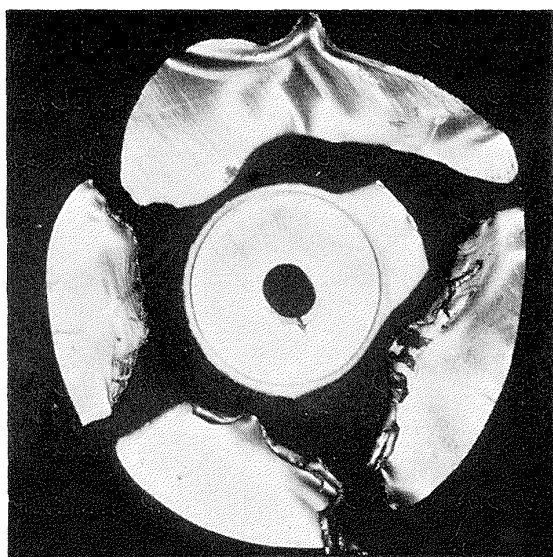
$2r_1$ mm	$2r_b$ mm	$2r_0$ mm	$\gamma_b = \frac{r_b}{r_0}$	n r.p.m.	v m/sec	$\frac{v_0}{v}$	備考
20	30	195	0.154	34,500	355	1.096	○
"	"	"	"	35,000			○
20	40	195	0.205	35,000	357	1.102	●
20	60	195	0.308	35,500	362	1.117	●
20	80	195	0.410	36,500	372	1.148	●
20	90	195	0.461	37,500	383	1.182	⊙
20	100	195	0.513	38,000	388	1.197	⊙
20	110	195	0.564	38,500	393	1.213	⊙
20	120	195	0.615	38,000	388	1.198	○
20	140	195	0.718	36,500	378	1.167	○
"	"	"	"	37,500			○



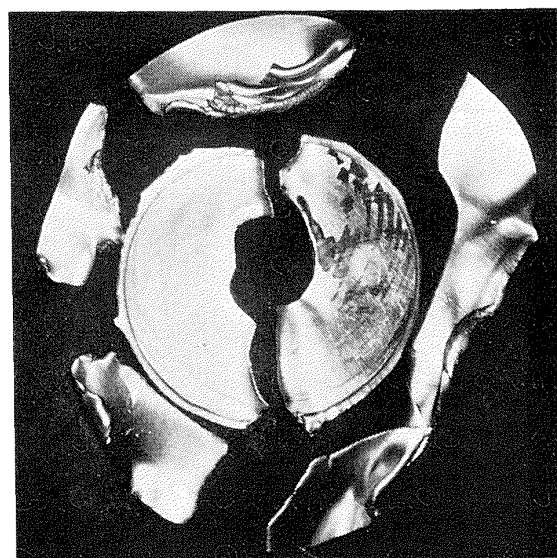
$$\bigcirc \left\{ \begin{array}{l} \gamma_b = 0.154 \\ n = 34,500 \end{array} \right.$$



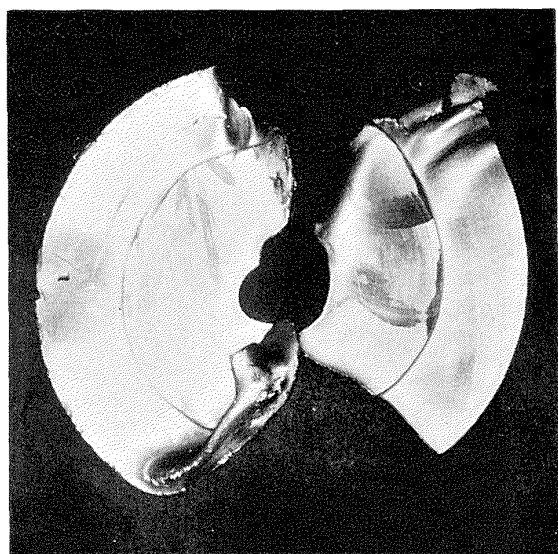
$$\bullet \left\{ \begin{array}{l} \gamma_b = 0.205 \\ n = 35,000 \end{array} \right.$$



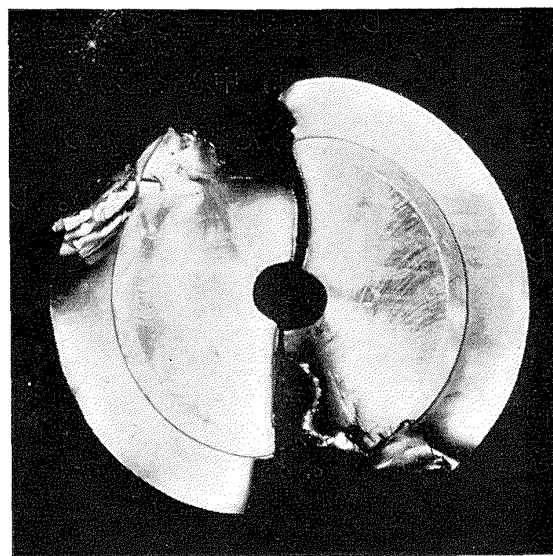
$$\bullet \left\{ \begin{array}{l} \gamma_b = 0.410 \\ n = 36,000 \end{array} \right.$$



$$\odot \left\{ \begin{array}{l} \gamma_b = 0.564 \\ n = 38,500 \end{array} \right.$$



$$\bigcirc \left\{ \begin{array}{l} \gamma_b = 0.615 \\ n = 38,000 \end{array} \right.$$



$$\bigcirc \left\{ \begin{array}{l} \gamma_b = 0.718 \\ n = 36,500 \end{array} \right.$$

第 4 図

実験に使用した車盤はボスがなければ一樣な厚さの円板となる。したがって、ボスの影響をみるためには車盤の破壊を円板の破壊と比較してみればよいと思う。円板の破壊はすでにわかっていて、車盤と同じ内外径比をもった円板が破壊するときの周速度は (1)' から $\rho=2.7$, $\gamma_1=0.1025$, $\sigma_B'=10.8\text{kg/mm}^2$ として、計算してみると $v_0=324\text{ m/sec}$ となる。第2表の v/v_0 は車盤の強度を円板と比較するために、車盤が破壊するときの周速度 v を円板の周速度 v_0 と比較したものである。

次に、車盤の破壊について、破壊が中心を通る横断面で起こる場合とボスの周りで起こる場合にわけて考察をし、さらに、破壊の条件についても考えて実験と比較してみることにする。

i) **中心を通る横断面で起こる破壊** 第3図に示した車盤をボスの部分とそうでない部分のAおよびBの二つの円板にわけたときに、それぞれの円板が単独に変形できるものならば、円板AもBも破壊の条件は(1)である。しかし、実際にはそうはいかないで、Bが変形をしようとしても円板Aはそれほど変形ができないので、ボスの周りになかなか大きな半径応力が作用することになる。したがって、AおよびBの円板の破壊に対しては、この半径応力の影響を考慮しなければならない。半径応力が円板の応力分布に及ぼす影響はAの円板ではBの円板に比べて肉厚が厚いので大したことではないが、Bの円板の応力分布にはかなり影響を及ぼすことになる。したがって、車盤の破壊が中心を通る横断面で起こる場合には、Aの円板の破壊は(1)の条件で起こると考えて大した誤差はないと思われるが、Bの円板の破壊については別に考慮する必要がある。

ボスの周りに作用する半径応力は引張りであるから、これはBの円板に対しては負の内圧として作用する。負の内圧が回転中の中空円板の内周に作用すれば、円板の応力分布は内圧が作用していない場合に比べて、半径応力 σ_r は増し、円周応力 σ_t は減じて、 σ_t と σ_r の差は小さくなる。しかし、ボスの周りに作用する半径応力の大きさがはっきりわからないので、 σ_t と σ_r の関係を知ることができない。Bの円板の強度の見当をつけるために、 σ_t と σ_r は一樣で、しかも同じである円板の強度について考えてみることにする。

$\sigma_t=\sigma_r$ で、しかも分布は一樣であるから、この場合の円板の変形は肉厚方向への圧縮である。圧縮歪みを ε_c とすれば、中心を通る円板の断面積は減って最初の断面積の $(1-\varepsilon_c)^{1/2}$ 倍となり、また、円板を半円にわけたときの重心の位置は移動して、遠心力の大きさは変形前の寸法をもとにして計算した値の $(1-\varepsilon_c)^{-1/2}$ 倍になる。したがって、円周応力を真応力 σ_t と呼称応力 σ_{0t} で表わしたときの関係は

$$\sigma_t = \frac{\sigma_{0t}}{1-\varepsilon_c},$$

圧縮による応力と引張りによる応力の関係は、圧縮歪み ε_c と伸び歪み ε_t とが次の関係を満足するときに等しくなる⁽⁵⁾。

$$1+\varepsilon_t = \frac{1}{1-\varepsilon_c}$$

これを上式に代入すれば

$$\sigma_t = \sigma_{0t}(1 + \varepsilon_t)$$

この関係は引張りによる真応力と呼称応力と同じであって、この場合の円板の強度は σ_B' ではなくて材料の抗張力 σ_B である。しかし、実際には円板Bの内周に負の内圧が作用しても、円板の応力分布は $\sigma_t = \sigma_r$ にならないので、円板の強度は σ_B' と σ_B の中間になるものと思われる。

結局、ボスをもった車盤の破壊が中心を通る横断面で起こるときの破壊の条件は次のように述べることができる；——

車盤を第3図に示すようにAとBの二つの円板にわけたときに、円板Aの円周応力の平均値が σ_B' 、円板Bの円周応力の平均値が σ_B' と σ_B の中間の値になったときである。この条件のもとにおける応力と遠心力の平衡式を立てれば次のようになる。

$$\sigma_B' \left[\lambda(r_0 - r_b) + t(r_b - r_1) \right] = \frac{1}{3} \rho \omega^2 \left[(r_0^3 - r_b^3) + t(r_b^3 - r_1^3) \right] \quad (2)$$

ただし、 t はボスの厚さと車盤の厚さとの比、すなわち円板AとBの厚さの比、

ω は車盤が破壊するときの角速度、

λ は円板Bの円周応力の平均値 $\bar{\sigma}$ と σ_B' との比であって、 λ の採るべき値は $1 < \lambda < \lambda_0$ である。ここに $\lambda_0 = \sigma_B / \sigma_B'$ 。

(2) の左辺は中心を通る横断面に作用している円周応力を積分した値になっており、右辺はそれと平衡を保っている遠心力を表わしたものである。(2) を書き直せば

$$\frac{1}{3} \rho v^2 = \sigma_B' \frac{\lambda(1 - \gamma_b) + t(\gamma_b - \gamma_1)}{(1 - \gamma_b^3) + t(\gamma_b^3 - \gamma_1^3)} \quad (2)'$$

ただし、 γ_1 は車盤の内外径比で、 r_1/r_0 、

γ_b はボス径と外径の比で r_b/r_0 、

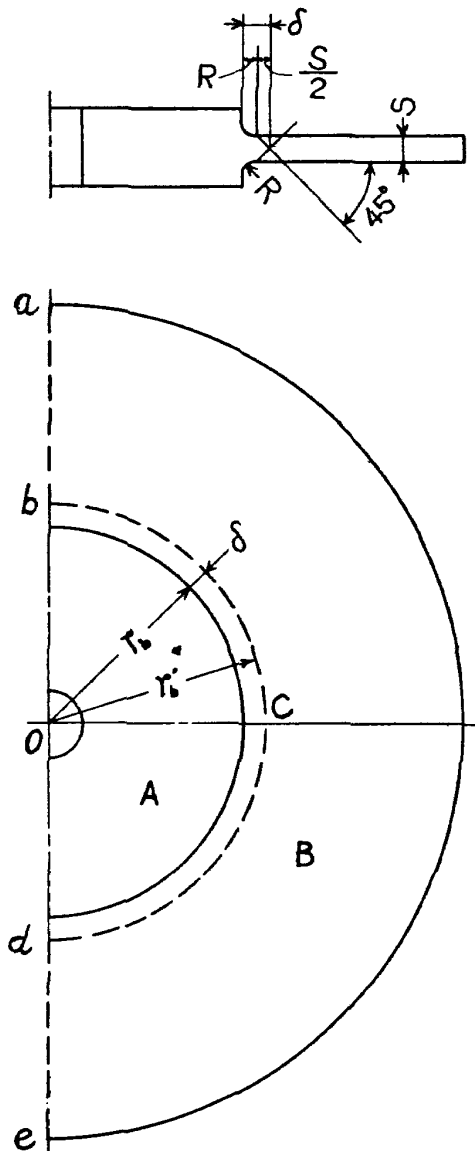
v は車盤が破壊するときの周速度で $r_0 \omega$ 。

車盤が破壊するときの周速度 v を同じ内外径比をもった円板が破壊するときの周速度 v_0 との比で表わせば、(2)' と (1)' から

$$\left(\frac{v}{v_0} \right)^2 = (1 + \gamma_1 + \gamma_1^2) \frac{\lambda(1 - \gamma_b) + t(\gamma_b - \gamma_1)}{(1 - \gamma_b^3) + t(\gamma_b^3 - \gamma_1^3)} \quad (3)$$

ii) **ボスの周りで起こる破壊** ボスは健在に残っていて、ボスの周りで起こっている破壊を写真で観察してみると、その破壊はボスから少し離れた円周上で起こっていると同時に、中心を通る横断面でも起こっていることが認められる。したがって、この場合の破壊は第5図において、点線で示した断面における破壊を考えるべきであろう。円板Bの ab と de の横断面で支持している応力は、前の中心を通る横断面で破壊が起こる場合について述べたと同じ理由から σ_B' と σ_B の中間

にあるはずである。ボスの周りの bcd で起こる破壊は、半径応力で起こっていることはわかるが、その大きさと破壊が起こるときのボスからの距離が問題である。



第 5 図

ボスは十分剛くて、回転によって円板Aは変形をしないものとして、ボスの周りの変形を考えてみることにする。第5図において、 R はボスの隅肉部における半径、 S は円板Bの厚さとする。ボスは回転によって変形をしないのであるから、ボスの隅肉部もほとんど変形をしないであろう。ボスの周りで変形できるのはボスから R の距離だけ離れた位置から外方の部分であって、そこでは図に示すような厚さ方向へ 45° に広がる変形を起こして半径方向に伸びるのである。この場合、破壊が起こる位置は図の点線で示した位置であって、これは円板の初めの寸法でいえば中心から半径 r_b' の円周上である。 r_b' は図から

$$r_b' = r_b + \delta$$

ただし、 $\delta = R + S/2$

ボスの周りの変形は、上で述べたように隅肉部も含めてボスは変形しないで、その隣りの部分が図に示すような方向に 45° に広がって半径方向に伸びるのであるから、変形は肉厚が減っただけ半径方向に伸びて、円周方向にはほとんど変形しないことになる。したがって、このときに起こる変形は半径方向に伸びる純粋剪断である。ボスの周りで変形が起これば、Bの円板ではその他の部分でも変形をして外径が広がるので遠心力は増すことになる。結局、ボスの周りで変形をすれば、ボスの周りに働く半径応力は変形に

よる肉厚の減少と遠心力の増加による二重の影響を受けることになる。この場合、半径応力の真応力 σ_r と呼称応力 σ_{or} の関係は近似的*に

$$\sigma_r \doteq \sigma_{or}(1 + \varepsilon_r)^2$$

ただし、 ε_r はボスの周りにおける半径方向の伸び歪み。

Mises-Hencky の塑性理論によれば純粋剪断と引張りによる応力の関係は

* ボスの周りで半径方向に伸びれば、円板Bの遠心力は増加することは確かであるが、ボスの周りで半径方向に変形しただけ増加するのかどうかは正確には分らない。しかし、上の σ_r と σ_{or} の関係は近似的ではあるが成り立つものと思う。

$$\sigma_{sh}/\sigma_{ten}=1.155$$

であるが、中西-佐藤の理論⁽⁶⁾では

$$\sigma_{sh}/\sigma_{ten}=8/7$$

であってその差はわずかであるが、もちろん後者の方が正しいと思っている。したがって、ボスの周りで局部収縮を起こして破壊するときの強度は $8/7 \sigma_B'$ となる。 σ_B' は今まで本文中にしばしば出てきた円輪の強度である。

結局、ボスをもった車盤の破壊がボスの周りで起こるとき条件は次のように述べる事ができる；——

第5図の点線で示した破断面の中 ab , de の円周応力の平均値が σ_B' と σ_B の中間のある値になり、 bcd で示したボスの周りの半径応力が $8/7 \sigma_B'$ になったときである。

この条件のもとにおける応力と遠心力の平衡式を立てれば次のようになる。

$$\sigma_B' \left[\lambda(r_0 - r_b') + \frac{8}{7} r_b' \right] = \frac{1}{3} \rho \omega^2 (r_0^3 - r_b'^3) \quad (4)$$

または

$$\frac{1}{3} \rho v^2 = \sigma_B' \frac{\lambda(1 - \gamma_b') + \frac{8}{7} \gamma_b'}{1 - \gamma_b'^3} \quad (4)'$$

(1)' を (4)' に代入して v/v_0 の関係を求めれば

$$\left(\frac{v}{v_0} \right)^2 = (1 + \gamma_1 + \gamma_1^2) \frac{\lambda(1 - \gamma_b') + \frac{8}{7} \gamma_b'}{1 - \gamma_b'^3} \quad (5)$$

ただし、 $\gamma_b' = \gamma_b + \delta/r_0$ で $\delta = R + S/2$ 。

以上述べたことから、ボスをもった車盤が破壊するときの周速度は、破壊が中心を通る横断面で起きるときには (3) で、ボスは健在であるがボスの周りで破壊が起きるときには (5) で与えられることになる。

実験と考察の比較 考察した結果を第2表に示した車盤の実験結果と比較してみることにする。

σ_B と σ_B' の比 λ_0 の値は材料の伸びならびに塑性曲線の形によって異なるけれども、実験に使用したアルミニウムの板では

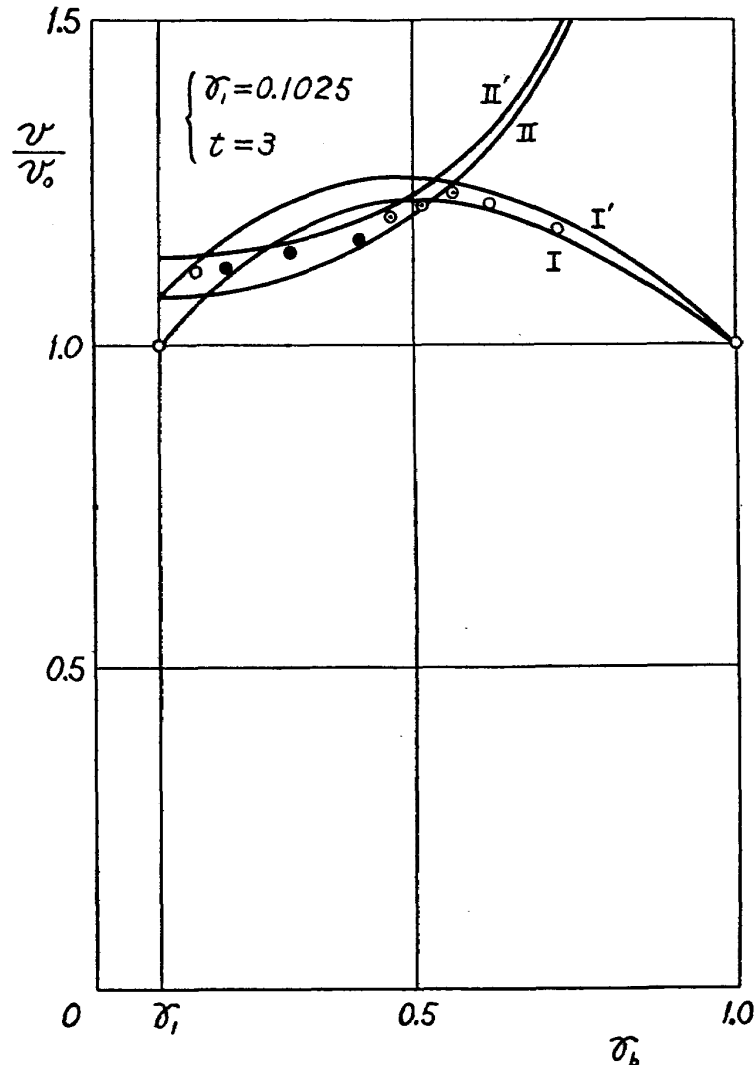
$$\lambda_0 = 1.15,$$

また、実験に使用した翼車ではボスの隅内部の半径は $R = 2 \text{ mm}$ 、車盤の厚さ $S = 2 \text{ mm}$ であるので $\delta = 3 \text{ mm}$ となる。 γ_b' と γ_b の関係は

$$\gamma_b' = \gamma_b + 0.031$$

したがって、(3) および (5) からボス径のみを変えたときの $v/v_0 \sim \gamma_b$ の関係を計算することができる。

第6図は縦軸に v/v_0 , 横軸に r_0 を採って第2表の実験結果を示したものである。○は車盤の破壊が中心を通る横断面で起こったものであり, ●はボスは残ってボスの周りで破壊が起こったものであり, ⊙は両方の破壊が起こっているものである。図の曲線 I と I' は (3) から計算したものであって, I は $\lambda=1$, I' は $\lambda=\lambda_0$ としたときのものである。また, 曲線 II と II' は (5) から計算



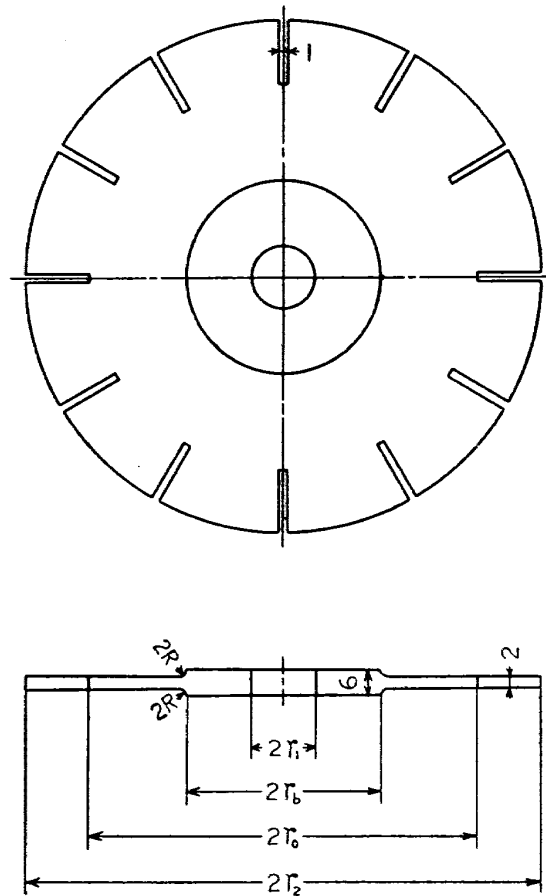
第6図

したものであって, II は $\lambda=1$, II' は $\lambda=\lambda_0$ としたときのものである。○で示した実験値は曲線 I と I' の中間にでており, ●で示した実験値は曲線 II と II' の中間にでていて, 実験結果は考察した結果と非常によく一致している。また, 曲線 I, I' と II, II' とが交る付近においては, 車盤の破壊は中心を通る横断面で起こってもよいし, ボスの周りで起こってもよいし, また, 両方の破壊が起こってもよい。実験結果はそうように起こっている。

実 験-2

この実験では, ボスをもった車盤の外周に翼を付けた翼車について, ボスが車盤の強度に及ぼす

影響を調べたものである。第7図は実験に用いた横型翼車の形を示したものであって、外周にスリットを付けた $(r_2 - r_0)$ の部分が実際の翼車における翼に相当した部分であり、車盤の内径は $2r_1$ 、外径は $2r_0$ であって、ボス径は $2r_b$ である。



第7図

実験に用いた翼車の寸法は第3表に示してある。 γ_1 は車盤の内外径比、 γ_2 は翼車の外径と車盤の外径との比であり、 γ_b はボス径と車盤の外径との比である。実験では γ_1 、 γ_2 は一定にして、 γ_b を変えた翼車についてスピントストを行ない破壊回転数を測定した。第3表中の v/v_0 は車盤の周速度を同じ内外径比をもった円板と比較したものであって、 v は車盤が破壊するときの周速度であり、 v_0 は円板の周速度である。車盤と同じ内外径比 $\gamma_1 = 0.125$ をもった円板の破壊試験はすでに第1表に示したように行なっているので、ここではその実験から求められた $v_0 = 321 \text{ m/sec}$ の値を採用した。

第8図は車盤の破壊の仕方とボス径との関係を示したものである。翼がある車盤の破壊においても翼のない車盤と同様に、破壊はボス径によって異なっていて、中心を通る横断面で起こっているもの、ボスは残っていてボスの周りで起こっているもの、また、それらの破壊が同時に起こっているもの、三種類の破壊の仕方が認められる。

車盤の外周に翼を付けたときには、回転による翼の遠心力は車盤に対して負の外圧として作用す

第3表 ($\gamma_1=0.125$, $\gamma_2=1.187$, $t=3$)

$2r_1$ mm	$2r_b$ mm	$2r_0$ mm	$2r_2$ mm	$\gamma_b = \frac{r_b}{r_0}$	n r.p.m.	v m/sec	$\frac{v_0}{v}$	備 考
20	20	160	190	0.125	31,500			○
"	"	"	"	"	32,000	266	0.830	○
"	"	"	"	"	32,000			○
20	30	160	190	0.188	33,000	276	0.862	⊙
20	40	160	190	0.250	34,000	285	0.888	⊙
"	"	"	"	"	34,000			●
20	60	160	190	0.375	34,000	289	0.901	●
"	"	"	"	"	35,000			●
20	80	160	190	0.500	35,000	291	0.908	●
"	"	"	"	"	34,500			●
20	100	160	190	0.625	37,500			⊙
"	"	"	"	"	35,000	307	0.958	⊙
"	"	"	"	"	37,500			●
"	"	"	"	"		318	0.990	●
"	"	"	"	"	38,000			⊙
20	120	160	190	0.750	39,000	327	1.017	⊙
"	"	"	"	"	39,000			⊙
20	130	160	190	0.813	37,000	312	0.973	○
"	"	"	"	"	37,500			○
20	140	160	190	0.875	38,000	314	0.979	○
"	"	"	"	"	37,000			○

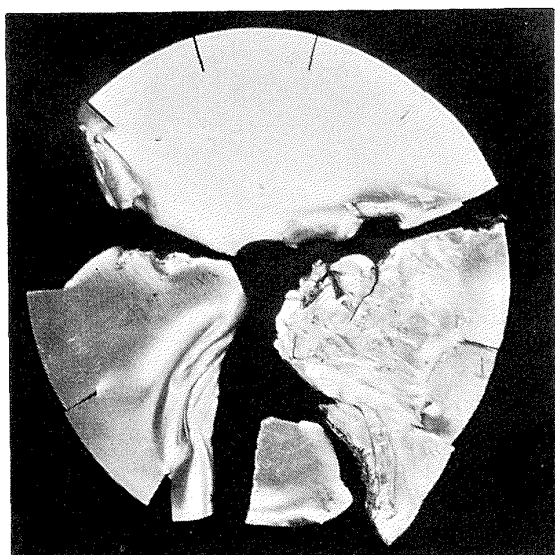
る。翼の遠心力が車盤に負の外圧として作用すれば、車盤の円周応力も増すが半径応力も増して、車盤の外周における半径応力は外圧と同じ値になる。このことはすでに述べたように、車盤をA、B二つの円板に分けたときに、Bの円板ではその内周に負の内圧が作用していることと相まって、半径応力 σ_r は増して円周応力 σ_t に近づいていくということである。したがって、翼をもった車盤が破壊するときの条件は、翼による遠心力の増加を考慮に入れさえすれば、翼のない車盤について述べた条件がそのまま適用できるものと思われる。

翼の遠心力を考慮に入れて、破壊が車盤の中心を通る横断面で起こるときに車盤の周速度 v を円板の周速度 v_0 をもとにしてだしてみると

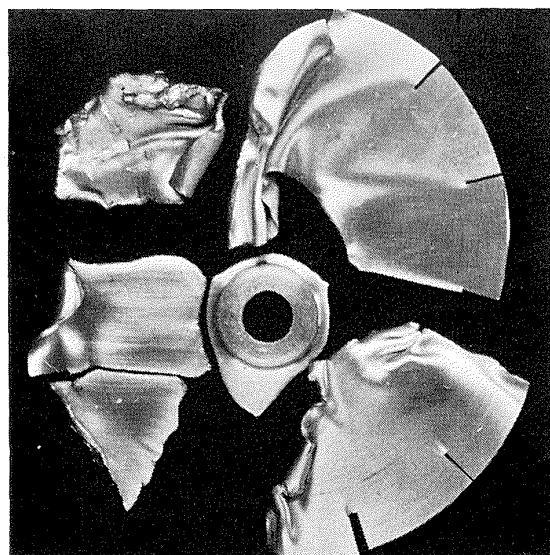
$$\left(\frac{v}{v_0}\right)^2 = (1 + \gamma_1 + \gamma_1^2) \frac{\lambda(1 - \gamma_b) + t(\gamma_b - \gamma_1)}{(\gamma_2^3 - \gamma_b^3) + t(\gamma_b^3 - \gamma_1^3)} \quad (6)$$

ボスが残って、破壊がボスの周りで起こるときには

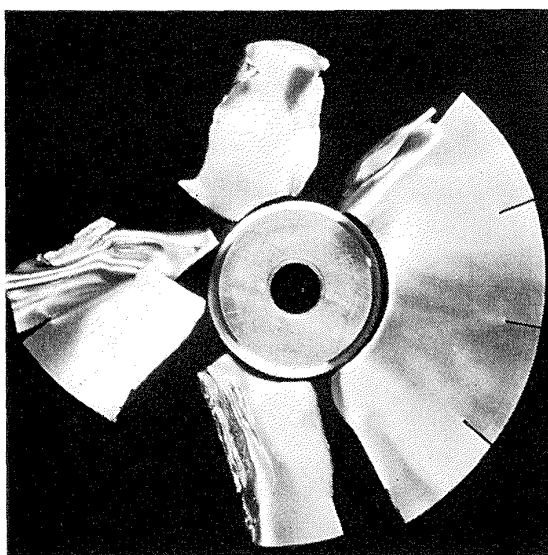
$$\left(\frac{v}{v_0}\right)^2 = (1 + \gamma_1 + \gamma_1^2) \frac{\lambda(1 - \gamma_b') + 8/7 \gamma_b'}{\gamma_2^3 - \gamma_b'^3} \quad (7)$$



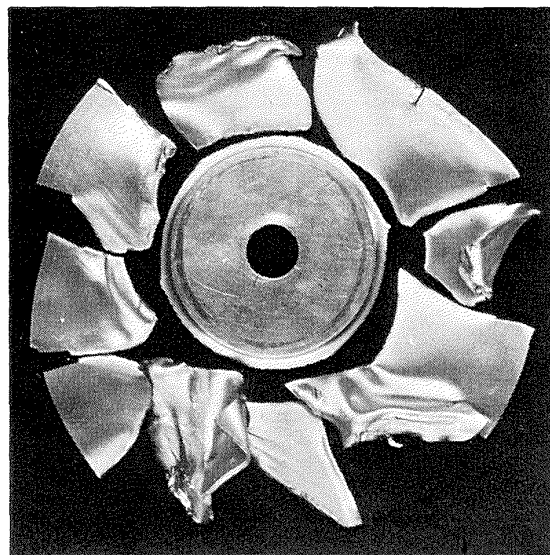
$$\bigcirc \left\{ \begin{array}{l} \gamma_b = r_1 \text{ (ボスなし)} \\ n = 32,000 \end{array} \right.$$



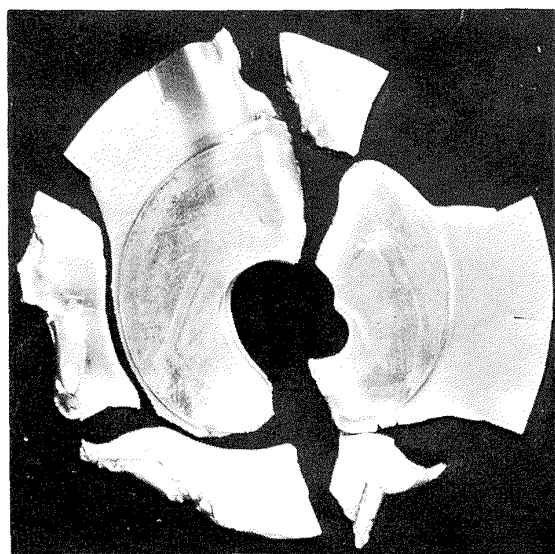
$$\bullet \left\{ \begin{array}{l} \gamma_b = 0.250 \\ n = 34,000 \end{array} \right.$$



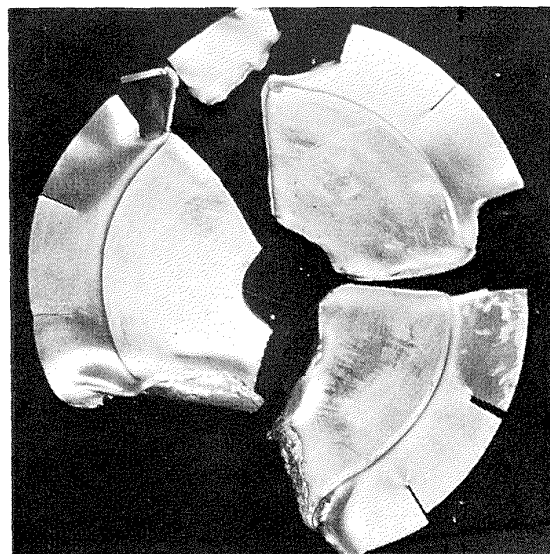
$$\bullet \left\{ \begin{array}{l} \gamma_b = 0.375 \\ n = 34,000 \end{array} \right.$$



$$\bullet \left\{ \begin{array}{l} \gamma_b = 0.500 \\ n = 35,000 \end{array} \right.$$



$$\odot \left\{ \begin{array}{l} \gamma_b = 0.688 \\ n = 38,000 \end{array} \right.$$



$$\bigcirc \left\{ \begin{array}{l} \gamma_b = 0.813 \\ n = 37,000 \end{array} \right.$$

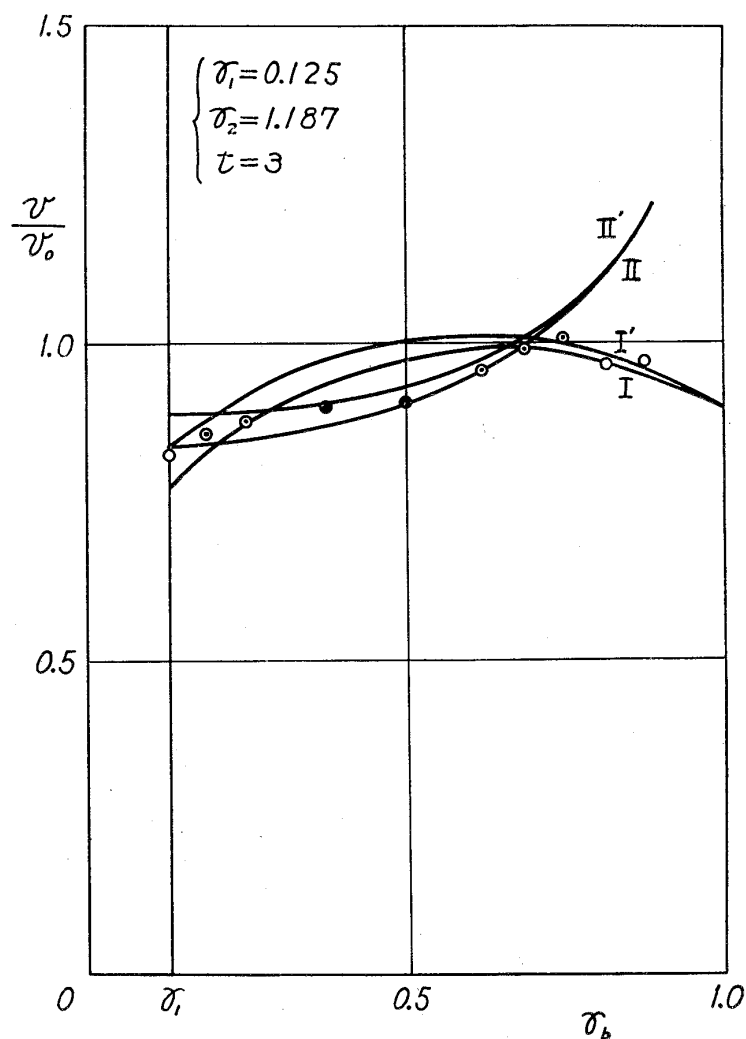
第 8 図

ただし, $1 < \lambda < \lambda_0$ で実験に用いた材料では $\lambda_0 = 1.15$,

$\gamma_b' = \gamma_b + \delta/r_0$ で実験に用いた翼車では $\gamma_b' = \gamma_b + 0.031$ 。

(6) および (7) において $\gamma_2 = 1.0$ とおけば, これらは翼のない車盤が破壊するときの周速度を示すものであって, それぞれ (3) および (5) となる。

実験に用いた翼車の寸法も材料の $\lambda_0 = \sigma_B / \sigma_B'$ の値もわかっているので, (6) および (7) から $v/v_0 \sim \gamma_b$ の関係は計算することができる。第9図は縦軸に v/v_0 , 横軸に γ_b を採って第3表に記した実験結果を示したものである。○は車盤の破壊が中心を通る横断面で起こったもの, ●はボスが残っていて破壊はボスの周りで起こったもの, ⊙は両方の破壊を起こしたものを示したものである。また, 図において曲線 I と I' は (6) から, II と II' は (7) から計算した $v/v_0 \sim \gamma_b$ の関係であって, 曲線 I と II は $\lambda = 1$, 曲線 I' と II' は $\lambda = \lambda_0$ として計算したものである。○で示した実験値は曲線 I と I' の中間に, ●で示した実験値は曲線 II と II' の中間にでており, また ⊙で示した実験値は 曲線 I, I' と II, II' とが交る付近にでていて, 実験値と計算値はすばらしくよく一致している。



第9図

実 験-3

この実験では第4表に示したような寸法の模型翼車について破壊試験を行なったものである。翼車の形は第7図に示したものと同一であるが、車盤は内径 $2r_1=20$ mm, 外径 $2r_0=160$ mm, ボス径 $2r_b=100$ mm, ボスの厚さ 6 mm, 車盤の厚さ 2 mm など一定にして、翼車の外径 $2r_2$ を変えて翼の長さを変えたものである。したがって、この実験では、翼の回転による遠心力がボスをもった車盤の回転強度に及ぼす影響について調べたことになっている。

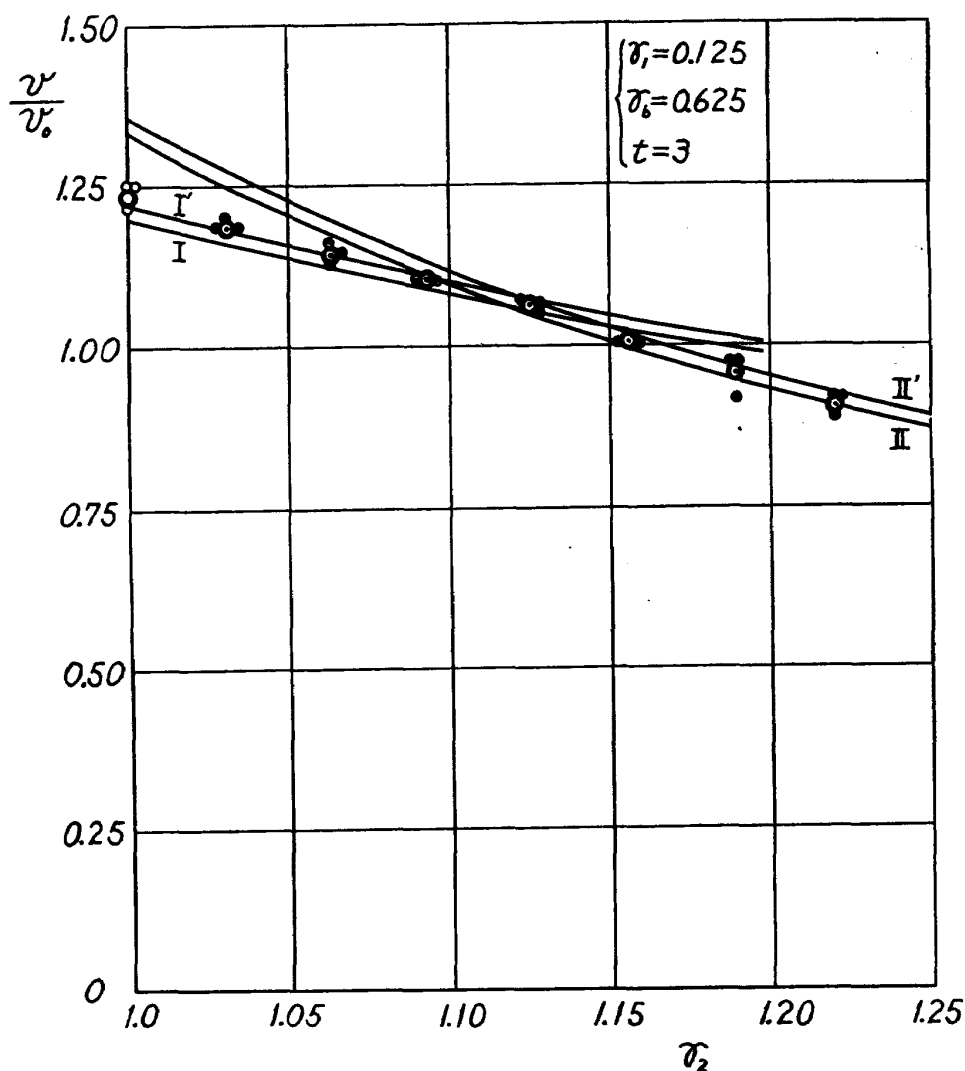
第4表中の n は車盤の破壊回転数である。実験には、同一寸法の翼車を3枚ずつ用意して、破壊試験を行なったのであるが、その破壊回転数はそれぞれよい一致を示している。また、表中の v は車盤が破壊したときの周速度であり、 v_0 は車盤と同じ内外径比 $\gamma_1=0.125$ をもった円板が破壊す

第4表 ($\gamma_1=0.125$, $\gamma_b=0.625$, $t=3$)

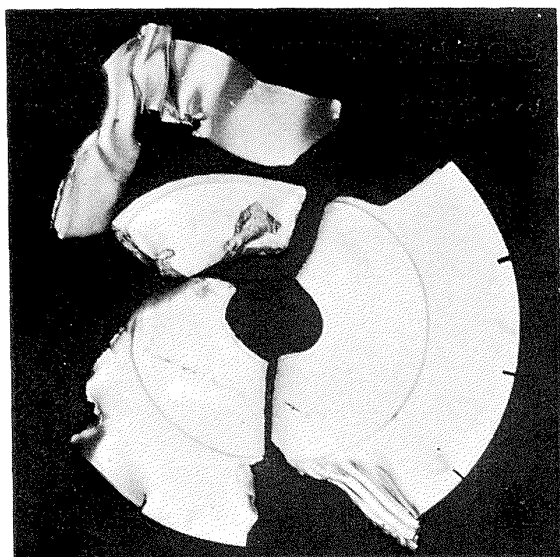
$2r_1$ mm	$2r_b$ mm	$2r_0$ mm	$2r_2$ mm	$\gamma_2=\frac{r_2}{r_0}$	n r.p.m.	v m/sec	$\frac{v}{v_0}$	備 考
20	100	160	160	1,000	48,000	402	1.254	○
〃	〃	〃	〃	〃	48,000	402	1.254	○
〃	〃	〃	〃	〃	47,000	394	1.228	○
20	100	160	165	1,031	46,000	385	1.201	⊙
〃	〃	〃	〃	〃	45,500	381	1.188	⊙
〃	〃	〃	〃	〃	45,500	381	1.188	●
20	100	160	170	1,062	43,500	364	1.136	⊙
〃	〃	〃	〃	〃	44,000	369	1.149	⊙
〃	〃	〃	〃	〃	45,000	377	1.175	⊙
20	100	160	175	1,094	42,500	356	1.110	⊙
〃	〃	〃	〃	〃	42,500	356	1.110	⊙
〃	〃	〃	〃	〃	42,500	356	1.110	⊙
20	100	160	180	1,125	41,000	343	1.071	⊙
〃	〃	〃	〃	〃	41,000	343	1.071	⊙
〃	〃	〃	〃	〃	40,500	339	1.005	●
20	100	160	185	1,157	38,500	322	1.005	●
〃	〃	〃	〃	〃	38,500	322	1.005	⊙
〃	〃	〃	〃	〃	38,500	322	1.005	●
20	100	160	190	1,187	37,500	314	0.979	⊙
〃	〃	〃	〃	〃	35,000	293	0.914	⊙
〃	〃	〃	〃	〃	37,500	314	0.979	●
20	100	160	195	1,219	35,000	293	0.914	●
〃	〃	〃	〃	〃	35,000	293	0.914	⊙
〃	〃	〃	〃	〃	34,000	285	0.888	●

るときの周速度である。表の最後の行に記した ○, ●, ⊙ の記号は車盤の破壊の仕方を示したものであって, それぞれ車盤の中心を通る横断面で起こったもの, ボスが残って, その周りで起こったもの, 両方の破壊が起こったものを示したものである。第 10 図は $\gamma_2=1.062$ および $\gamma_2=1.219$ の翼車が破壊したときの破壊の仕方を示したものである。これらの実験結果からみて, 車盤の破壊は翼の長さによって異なっていて, 翼が短いときには車盤の中心を通る横断面で起こり, 翼が長いときにはボスの周りで起こる傾向があるようである。

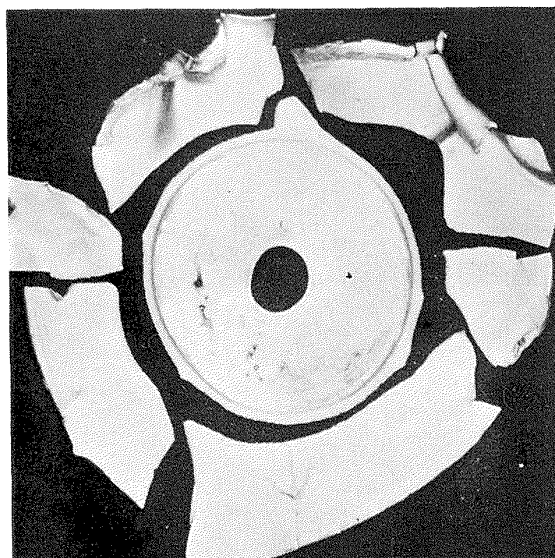
第 11 図は縦軸に v/v_0 を採り, 横軸に γ_2 を採って第 4 表に記した実験結果を示したものである。また図中の曲線 I, I' ならびに II, II' はそれぞれ (6), (7) からこの場合の翼車について $v/v_0 \sim \gamma_2$ の関係を計算したものであって, 曲線 I と II は $\lambda=1$, 曲線 I' と II' は $\lambda=\lambda_0$ として計算したものである。実験値はそれぞれ曲線 I と I' ならびに曲線 II と II' の中間にでいて, 実験と計算した結果はよく一致している。また, 曲線 I, I' と II, II' は $\gamma_2=1.125$ 付近で交っていて, $\gamma_2 < 1.125$ の翼車では破壊は車盤の中心を通る横断面で起こり, $\gamma_2 > 1.125$ の翼車ではボス



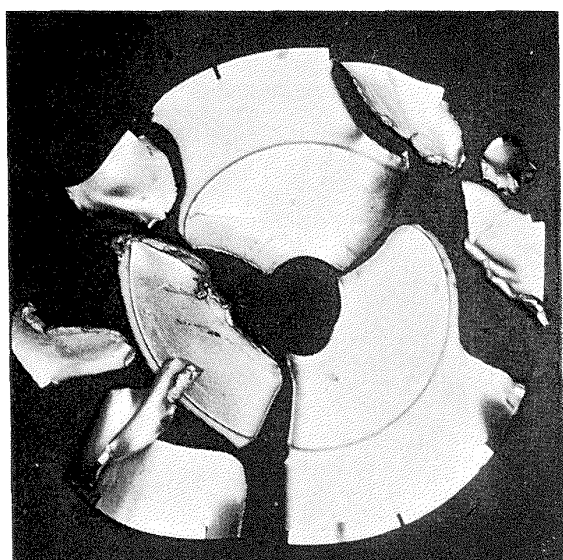
第 11 図



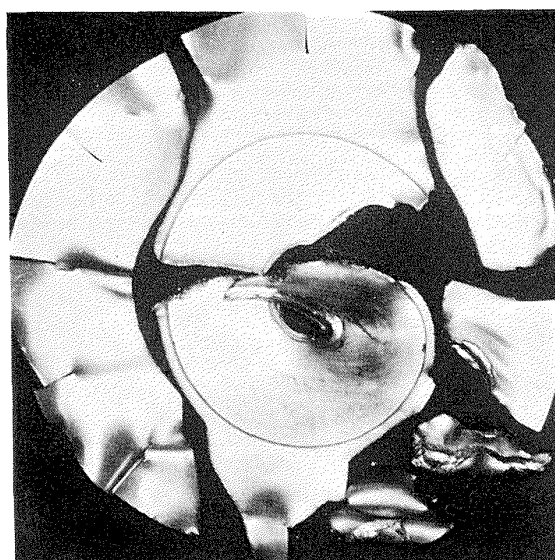
$$\odot \begin{cases} \gamma_2 = 1.062 \\ n = 43,500 \end{cases}$$



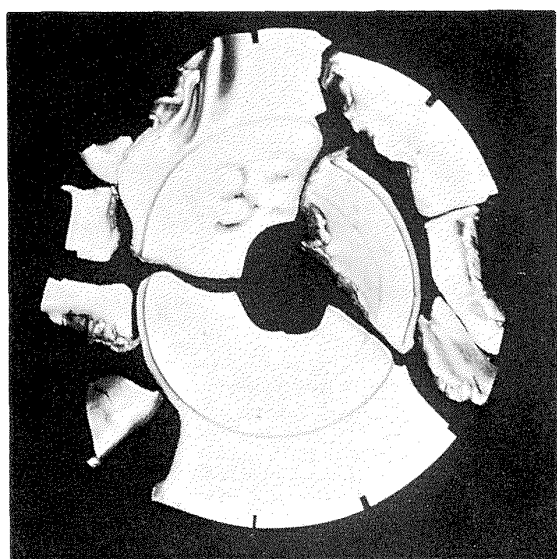
$$\bullet \begin{cases} \gamma_2 = 1.219 \\ n = 35,000 \end{cases}$$



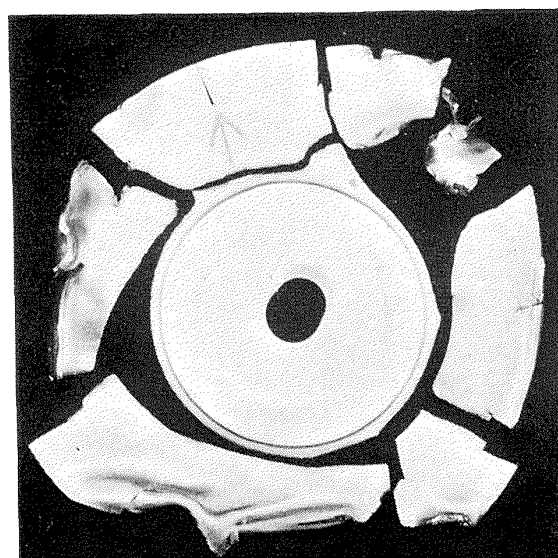
$$\odot \begin{cases} \gamma_2 = 1.062 \\ n = 44,000 \end{cases}$$



$$\odot \begin{cases} \gamma_2 = 1.219 \\ n = 35,000 \end{cases}$$



$$\odot \begin{cases} \gamma_2 = 1.062 \\ n = 45,000 \end{cases}$$



$$\bullet \begin{cases} \gamma_2 = 1.219 \\ n = 34,000 \end{cases}$$

第 10 図

は残って破壊はボスの周りで起こることを示している。このことは、実験結果が翼の長さが短いときには破壊は車盤の中心を通る横断面で起こり、翼が長いときにはボスの周りで起こる傾向を示していることと一致していることである。

結 論

本文では、ボスをもった車盤の塑性域における応力分布を厳密に求めることが困難であるので、かなり大胆な考察にもとづいて車盤の破壊の条件を示し、これと実験と比較した結果を述べた。その結果、実験値は第 6, 9 および 11 図に示したように、破壊が中心を通る横断面で起こるときの周速度は曲線 I と I' の中間に、また、ボスの周りで起こるときには曲線 II と II' の中間にでてくることがわかった。曲線 I と I' で表わされる周速度の違いも、曲線 II と II' で表わされる周速度の違いもわずかであるにもかかわらず、計算値と実験値はよく一致していることからみて、ここで示した破壊の条件はかなりよい精度をもって車盤の破壊を示しているものと思われる。

ボスをもった車盤の破壊には車盤の中心を通る横断面で起こるものと、ボスは健在であるがボスの周りで起こるものがあるということは、実際に車盤を設計するときに注意を要することである。その理由は、中心を通る横断面で破壊が起こるのはせっかく付けたボスが付け足りないことを意味し、またボスが健在に残って、その周りで破壊が起こるのは必要以上にボスを付けたことを意味しているからである。このためには車盤の厚さが決り、翼の大きさが決れば、破壊が曲線 I, I' と II, II' とが交る付近で起こるようにボスの厚さならびにボス径をえらぶべきであろう。

終りにのぞみ、終始ご指導を賜った中西不二夫先生に深く謝意を表する次第である。また、実験を手伝ってくれた実験室の神保勝久君、渡辺一郎君にも厚くお礼を申し上げる次第である。

文 献

- (1) 佐藤和郎：航空学会誌 10 巻 105 号 (昭 37)
- (2) 佐藤和郎, 永井文雄：航技研報告 TR-11 (昭 36)
- (3) 佐藤和郎, 永井文雄：航技研報告 TR-38 (昭 38)
- (4) 中西不二夫：機械学会論文集 18 巻 75 号 (昭 27)
- (5) 佐藤和郎：機械学会論文集 24 巻 143 号 (昭 33)
- (6) 中西不二夫, 佐藤和郎：機械学会論文集 25 巻 155 号 (昭 34)

付 録

本文中に述べた実験はすべてアルミニウムを使用した車盤についてのものであった。アルミニウム以外の材料からなる車盤についても、著者らの破壊の条件は適用できるものと思っている。幸い軟鋼からなる車盤についての実験があるので、それを紹介しておこう。

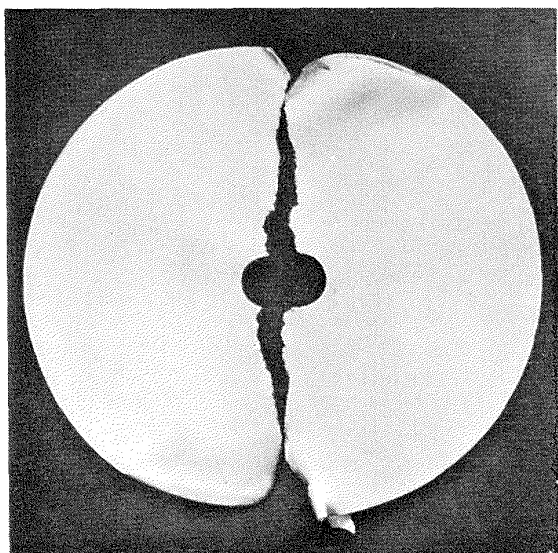
実験に使用した車盤の寸法は付1表に示してあるように、内径 $2r_1$ 、外径 $2r_0$ 、ボスと車盤の厚さの比などは一定にして、ボス径 $2r_b$ のみを変えたものである。したがって、実験はボスが車盤の強度に及ぼす影響について、調べたことになっている。表において n は車盤の破壊回転数、 v は車盤が破壊するときの周速度、 v_0 は車盤と同じ内外径比をもった円板が破壊するときの周速度である。

付1表 ($\gamma_1=0.1025$ $t=2.5$)

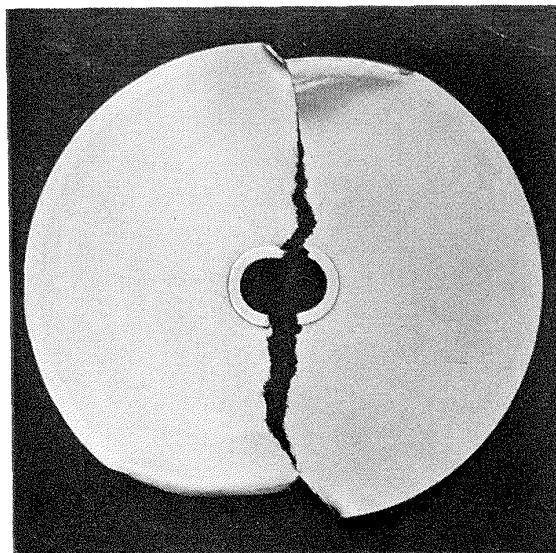
$2r_1$ mm	$2r_b$ mm	$2r_0$ mm	$\gamma_b = \frac{r_b}{r_0}$	n r.p.m.	v m/sec	$\frac{v}{v_0}$	備考
20	20	195	0.1025	35,200	$v=359$	1.000	○
20	30	195	0.154	35,200	376	1.045	○
"	"	"	"	38,000			○
20	50	195	0.257	42,800	437	1.216	●
"	"	"	"	42,800			●
20	70	195	0.359	40,000	408	1.137	●
20	80	195	0.410	41,600	425	1.182	●
20	100	195	0.513	42,400	433	1.204	○
20	120	195	0.615	40,000	427	1.187	○
"	"	"	"	43,600			○
20	140	195	0.718	41,200	421	1.171	○
20	160	195	0.820	38,000	388	1.080	○
20	180	195	0.923	34,800	355	0.988	○

付1図は車盤の破壊の仕方を示したものである。破壊の仕方はアルミニウムの車盤と同様にボス径によって異なっていて、車盤の中心を通る横断面で起こるものと、ボスは健全に残っているがボスの周りで起こるものがある。これらの破壊はそれぞれ ○, ● の記号で記しておいた。

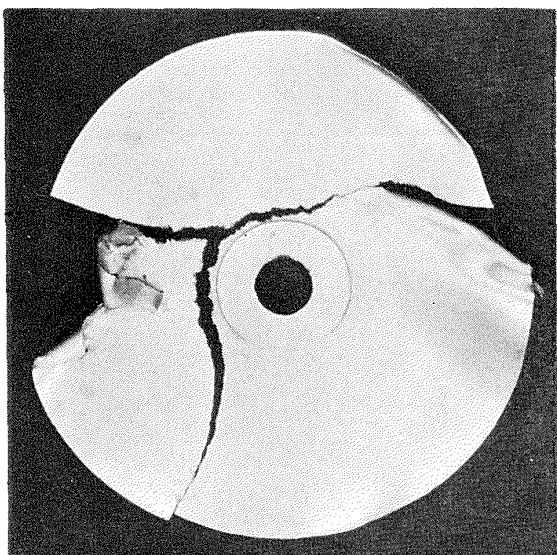
付2図は縦軸に v/v_0 を、横軸に γ_b を採って実験値を示したものである。また図の曲線 I, I' と曲線 II, II' はそれぞれ (3) および (5) を計算したものであって、I および II は $\lambda=1$, I' および II' は $\lambda=\lambda_0$ としたときのものである。 λ_0 は引張りによる応力と歪みの関係から求めたものである。



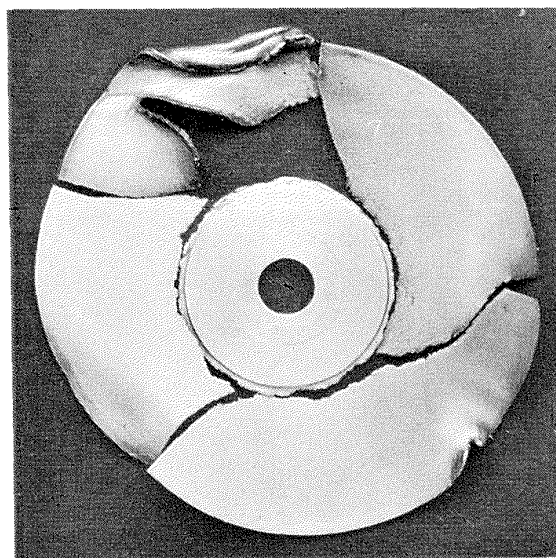
$$\bigcirc \left\{ \begin{array}{l} \gamma_b = r_1 \text{ (ボスなし)} \\ n = 35,200 \end{array} \right.$$



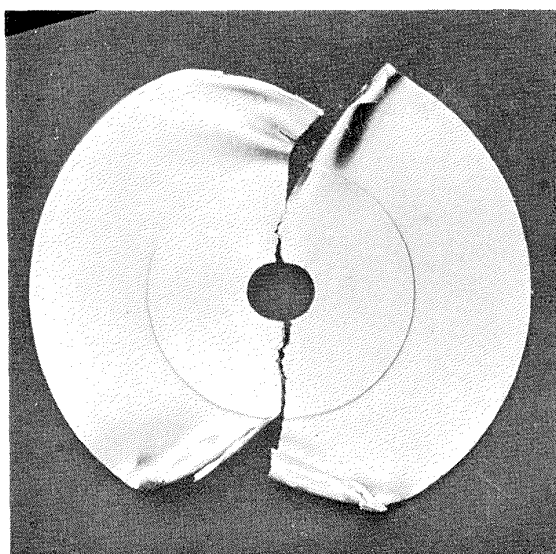
$$\bigcirc \left\{ \begin{array}{l} \gamma_b = 0.154 \\ n = 38,000 \end{array} \right.$$



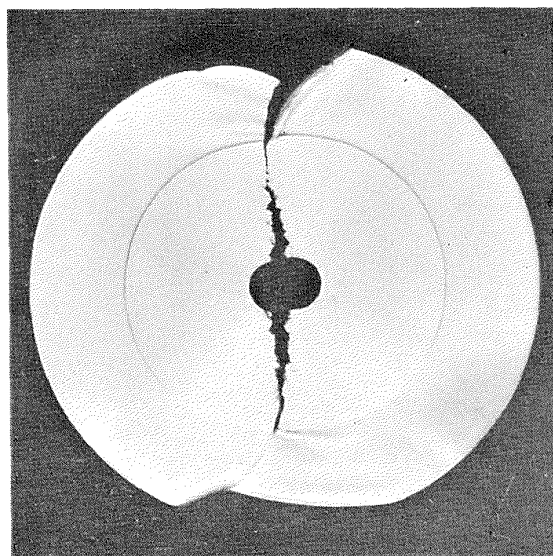
$$\bullet \left\{ \begin{array}{l} \gamma_b = 0.257 \\ n = 42,800 \end{array} \right.$$



$$\bullet \left\{ \begin{array}{l} \gamma_b = 0.410 \\ n = 41,600 \end{array} \right.$$

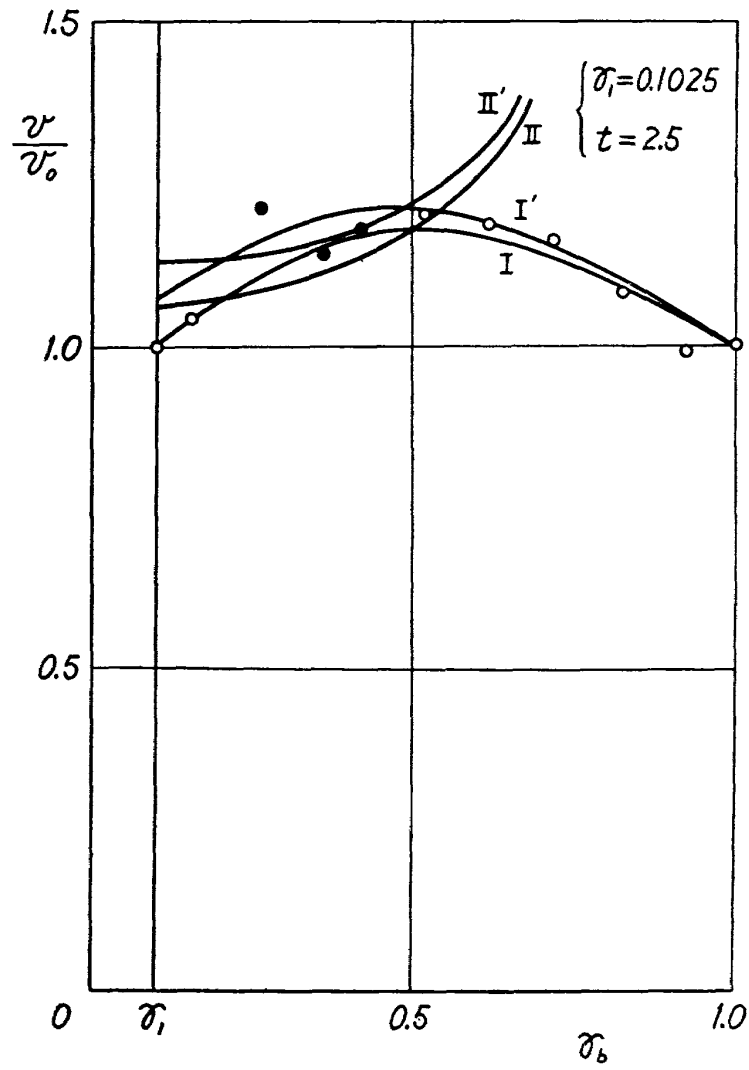


$$\bigcirc \left\{ \begin{array}{l} \gamma_b = 0.513 \\ n = 42,4000 \end{array} \right.$$



$$\bigcirc \left\{ \begin{array}{l} \gamma_b = 0.615 \\ n = 40,000 \end{array} \right.$$

付 1 図



付 2 図

って、この場合 $\lambda_0=1.15$ である。実験と計算値とはアルミニウムの車盤の場合ほどよく合っているとはいえないが、実験の性質からみて、この程度ならばだいたい合っているといってよいだろう。

<p>NAL TR-55 航空宇宙技術研究所 ボスをもった車盤の回転強度</p> <p>1963 年 11 月 21 ページ</p>	<p>I. 佐藤 和郎 永井 文雄 II. NAL TR-55 III. 539.4.013</p>	<p>NAL TR-55 航空宇宙技術研究所 ボスをもった車盤の回転強度</p> <p>1963 年 11 月 21 ページ</p>	<p>I. 佐藤 和郎 永井 文雄 II. NAL TR-55 III. 539.4.013</p>
<p>この報告では、車盤の中心部にボスをもった模型翼車について回転試験を行ない、ボスが車盤の回転強度に及ぼす影響について述べたものである。</p> <p>実験ではボスの付け方と車盤の破壊回転数ならびに破壊の起こり方について調べた。破壊の起こり方はボスの付け方によって、車盤の中心を通る横断面で起こるものと、ボスは破壊しないでボスの周りで起こるものの2種類のものがある。</p> <p>なお、本文中には材料の延性ならびに車盤の応力分布を考慮して、車盤が破壊するときの条件を示した。この条件は近似的なものであるが、実験結果と一致しており、また、ボスが車盤の強度に及ぼす影響をよく説明することができる。</p>		<p>この報告では、車盤の中心部にボスをもった模型翼車について回転試験を行ない、ボスが車盤の回転強度に及ぼす影響について述べたものである。</p> <p>実験ではボスの付け方と車盤の破壊回転数ならびに破壊の起こり方について調べた。破壊の起こり方はボスの付け方によって、車盤の中心を通る横断面で起こるものと、ボスは破壊しないでボスの周りで起こるものの2種類のものがある。</p> <p>なお、本文中には材料の延性ならびに車盤の応力分布を考慮して、車盤が破壊するときの条件を示した。この条件は近似的なものであるが、実験結果と一致しており、また、ボスが車盤の強度に及ぼす影響をよく説明することができる。</p>	
<p>NAL TR-55 航空宇宙技術研究所 ボスをもった車盤の回転強度</p> <p>1963 年 11 月 21 ページ</p>	<p>I. 佐藤 和郎 永井 文雄 II. NAL TR-55 III. 539.4.013</p>	<p>NAL TR-55 航空宇宙技術研究所 ボスをもった車盤の回転強度</p> <p>1963 年 11 月 21 ページ</p>	<p>I. 佐藤 和郎 永井 文雄 II. NAL TR-55 III. 539.4.013</p>
<p>この報告では、車盤の中心部にボスをもった模型翼車について回転試験を行ない、ボスが車盤の回転強度に及ぼす影響について述べたものである。</p> <p>実験ではボスの付け方と車盤の破壊回転数ならびに破壊の起こり方について調べた。破壊の起こり方はボスの付け方によって、車盤の中心を通る横断面で起こるものと、ボスは破壊しないでボスの周りで起こるものの2種類のものがある。</p> <p>なお、本文中には材料の延性ならびに車盤の応力分布を考慮して、車盤が破壊するときの条件を示した。この条件は近似的なものであるが、実験結果と一致しており、また、ボスが車盤の強度に及ぼす影響をよく説明することができる。</p>		<p>この報告では、車盤の中心部にボスをもった模型翼車について回転試験を行ない、ボスが車盤の回転強度に及ぼす影響について述べたものである。</p> <p>実験ではボスの付け方と車盤の破壊回転数ならびに破壊の起こり方について調べた。破壊の起こり方はボスの付け方によって、車盤の中心を通る横断面で起こるものと、ボスは破壊しないでボスの周りで起こるものの2種類のものがある。</p> <p>なお、本文中には材料の延性ならびに車盤の応力分布を考慮して、車盤が破壊するときの条件を示した。この条件は近似的なものであるが、実験結果と一致しており、また、ボスが車盤の強度に及ぼす影響をよく説明することができる。</p>	

TR-40	胴体内圧繰返し荷重試験装置について Repeated Load Testing Facility for Full-Scale Aircraft Fuselage Structures	1963年2月	竹内和之, 川島矩郎 野原利雄
TR-41	幅射熱量計の較正 Calibration of Radiometer	1963年2月	竹中幸彦, 江川幸一 小川鉦一
TR-42	非定常境界層の相似解とその安定 A Similar Solution of Unsteady Laminar Boundary Layer and Its Stability Characteristics	1963年7月	小橋安次郎, 恩地 瑛
TR-43	超音速における操縦面の効きについて On the Effectiveness of Control Surfaces in Supersonic Flow	1963年2月	河崎俊夫
TR-44	高速翼列の実験について (流入角の大きい減速翼列の予備実験) Some Notes about the Effect of Tunnel Configuration and Testing Technique on Compressor Cascade Performance	1963年2月	近藤 博, 襄田光弘 坂口 一, 山崎紀雄
TR-45	固有問題 $(\sum \lambda^k A_k)x=0$ の数値解法 A Numerical Method for the Eigenvalue Problem $(\sum \lambda^k A_k)x=0$	1963年4月	戸川隼人
TR-46	翼の固有振動数に関する一解析法 On the Vibration Analysis of Aircraft Wings	1963年6月	川井忠彦, 泉日出夫 戸川隼人, 林 洋一
TR-47	鋳鉄円板の回転破壊におけるコリオリの力の影響 Influence of Coriolis' Force on the Burst of Rotating Disc of Cast Iron	1963年8月	佐藤和郎, 永井文雄
TR-48	曲面に沿う境界層 Effects of Surface Curvature on Laminar Boundary-Layer Flow	1963年8月	林 二 識
TR-49	高速軸流圧縮機の研究 (Ⅲ) An Investigation of High Speed Axial Flow Compressor (Ⅲ)	1963年9月	松木正勝, 宮地敏雄 大山耕一, 吉田 晃 西脇英夫, 岩部柱相
TR-50	境界収縮法による偏微分方程式の境界値問題の数値解法 Numerical Method for Boundary Value Problems of Partial Differential Equations by Boundary Contraction	1963年9月	樋口一雄, 能美 力
TR-51	人間の静的不安定系の制御能力 Human Control Ability of the Statically Unstable System	1963年9月	武田 峻
TR-52	粒状加熱器の熱特性 Thermal Characteristics of a Pabble-Bed Heater	1963年9月	林 二 識
TR-53	円管流の非定常熱伝達 第1報 一壁温が時間と流向距離のみによる場合一 Thermal Characteristics of the Unsteady Flow through a Circular Pipe whose Temperature depends on Time and Flow-Directional Distance only	1963年10月	林 二 識
TR-54	偏微分方程式の混合境界値問題の差分法による数値解法 Difference Method for the Mixed Boundary Value Problems	1963年10月	三好 甫

航空宇宙技術研究所報告 55号

昭和 38 年 11 月 発行

発 行 所 航空宇宙技術研究所
東京都調布市深大寺町 1880
電話武蔵野(0422)(3)5171(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