

航空技術研究所報告

TECHNICAL REPORT OF NATIONAL AERONAUTICAL LABORATORY

TR-38

鑄鉄のような脆性材料からなる
円板の回転強度

佐藤和郎・永井文雄

1963年1月

航空技術研究所
NATIONAL AERONAUTICAL LABORATORY

TR- 5	航空技術研究所 (60 cm×60 cm) 遷音速フラッタ試験設備の計画と整備試験 Design and Development of N. A. L. 60 cm×60 cm Transonic Blowdown Wind Tunnel for Flutter Testing	1960 年 12 月	中井 暎一, 橋 爪 宏 中村 泰治
TR- 6	高温歪ゲージの温度特性 Temperature Characteristics of High Temperature Strain Gage	1960 年 12 月	竹 中 幸 彦
TR- 7	遷音速風洞の測定部 On the Transonic Test Section	1961 年 1 月	村 崎 寿 満
TR- 8	繰返し荷重装置試験の予備試験 Preliminary Study for Development of Repeated Load Testing Rigs for Full-Scale Aircraft Structures	1961 年 3 月	竹 内 和 之, 飯田宗四郎
TR- 9	遷音速流小擾乱理論の研究 (I) —非線型補正理論— Studies on the Small Disturbance Theory of Transonic Flow (I) —Non-Linear Correction Theory—	1961 年 3 月	細 川 巖
TR-10	喰違い角の大きい減速翼列の研究 Cascade Tests of High Stagger Compressor Blades	1961 年 3 月	松 木 正 勝, 高原北雄 西脇 英夫, 森田 光男
TR-11	軟鋼円板の回転による降伏 Yielding of Rotating Discs of Mild Steel	1961 年 4 月	佐 藤 和 郎, 永井文雄
TR-12	薄肉開断面梁の自由振動について On the Natural Vibration of Thin-Walled Beams of Open Cross Section	1961 年 5 月	川 井 忠 彦, 塙 武 敏
TR-13	衝撃波と境界層の干渉についての実験的研究 Experimental Results of the Interaction between Shock Wave and Turbulent Boundary Layer	1961 年 7 月	須 郷 道 也, 伝田幸雄
TR-14	電磁流体の圧縮性境界層 On Compressible Boundary Layer in Magnetodynamics	1961 年 7 月	須 郷 道 也, 小沢五郎
TR-15	振動翼用圧力ピックアップの試作・較正 Miniature Pressure Pickups for Measuring the Pressure on Oscillating Airfoils in Supersonic Flow	1961 年 8 月	石 井 孝 雄, 柳 沢 三 憲
TR-16	放物型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 On the Difference Method Solutions of the Mixed Boundary Value Problems of Parabolic Partial Differential Equations	1961 年 11 月	樋 口 一 雄, 三 好 甫
TR-17	荷電ビームによる気流密度測定の理論的考察 A Theoretical Comment on the Charge-Beam Method of Measuring Gas Density	1961 年 12 月	和 田 勇, 細 川 巖 三 好 甫
TR-18	前置静翼々列と喰違い角の大きい減速翼列の二次元低速翼列性能と回転翼列性能との比較 Comparison of Inlet Guide Vane and High Stagger Compressor Blade Performance in a Rotor and in Cascade	1961 年 11 月	松 木 正 勝
TR-19	高速翼車の回転強度 Strength of High-Speed Rotor	1961 年 12 月	佐 藤 和 郎, 永井文雄
TR-20	Blasius 型微分方程式の両側無限遠境界値問題の数値解法 A Numerical Method for Solving Blasius' Type Differential Equation	1962 年 1 月	樋 口 一 雄, 戸川隼人
TR-21	遷音速における二次元操縦面の研究 (I) An Investigation of Two-dimensional Control Surface at Transonic Speed (I)	1962 年 1 月	神 谷 信 彦
TR-22	変断面梁の曲げ自由振動について On the Free Lateral Vibration of a Beam with Variable Cross Section	1962 年 2 月	川 井 忠 彦, 戸川隼人 林 洋 一
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 島 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

鑄鉄のような脆性材料からなる円板の回転強度*

佐藤 和郎**・永井 文雄**

Strength of Rotating Discs of Brittle Material like Cast Iron

By Yasuo SATO and Fumio NAGAI

Bursting tests of rotating discs of cast iron were carried out and the experimental relation between the bursting speed v and the ratio γ of the inner to the outer diameter of the disc was obtained as shown in Fig. 4. In this figure, the data can be separated into two groups by curves I and II.

The conditions of the yielding of mild steel are well known, so we have discussed the experimental data by comparing it with that on the yield point of the rotating discs of mild steel which is shown in Fig. 7, and we concluded the following:

- (1) The phenomenon of the rupture of brittle material like cast iron is similar to that of the yielding of mild steel and they are influenced by stress distribution.
- (2) In case the gradient of the stress distribution is not so sharp, the rupture takes place as a problem of the whole section.
- (3) In case the gradient of the stress distribution is sharp, the rupture takes place locally at the point of the maximum stress.

In Fig. 4, the curves I and II show respectively the rupture in the cases of (2) and (3). Concerning the condition of the rupture, it is already known in the case of (2), but not yet known in the case of (3).

緒 言

円板の回転による応力分布は内外径比によって異なる。この報告は、伸びの小さい材料からなる高速車盤の回転強度を知る目的で、鑄鉄円板について円板の応力分布が破壊に及ぼす影響を調べたものである。

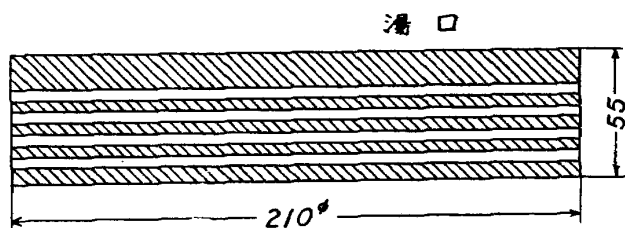
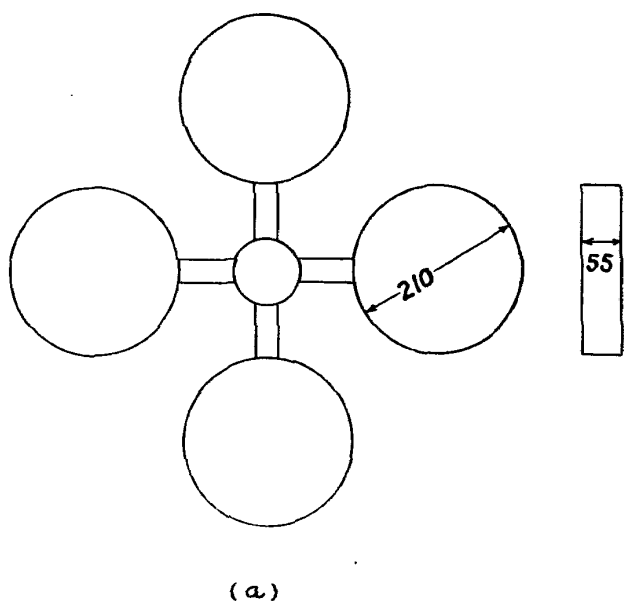
なお、実験結果の整理ならびに考察をするにあたっては、理想的な円輪（内径と外径が等しい円板）の強度を基準にした。その理由は、円輪の回転による応力状態は円周方向への均等引張りであって、単純であるので、これは円板の強度の基準として採用することができるからである。

* 昭和 38 年 1 月 28 日受付

** 原動機部

実 験

実験を行なう上に注意をはらったことは、できるだけ均質な鋳物を作ることである。このために実験用の円板を作る鋳物の素材は、第1図 (a) に示すような鋳型を5組作って、20 個の素材を同時に鋳造した。円板の削り出し方は、(b) 図に示すように、素材の両端面を削り落して、比較的均質と思われる素材の中央部から4枚採取することにした。このようにして作った円板でも、実験値には“ばらつき”がでることは予想されるので、同じ内外径比をもった円板を数枚ずつ用意した。

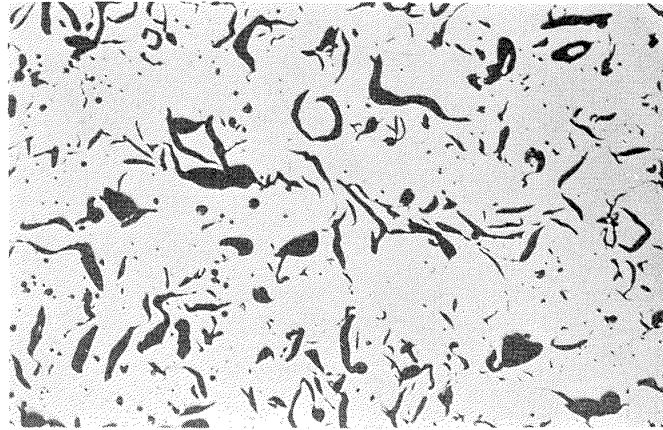


(b)

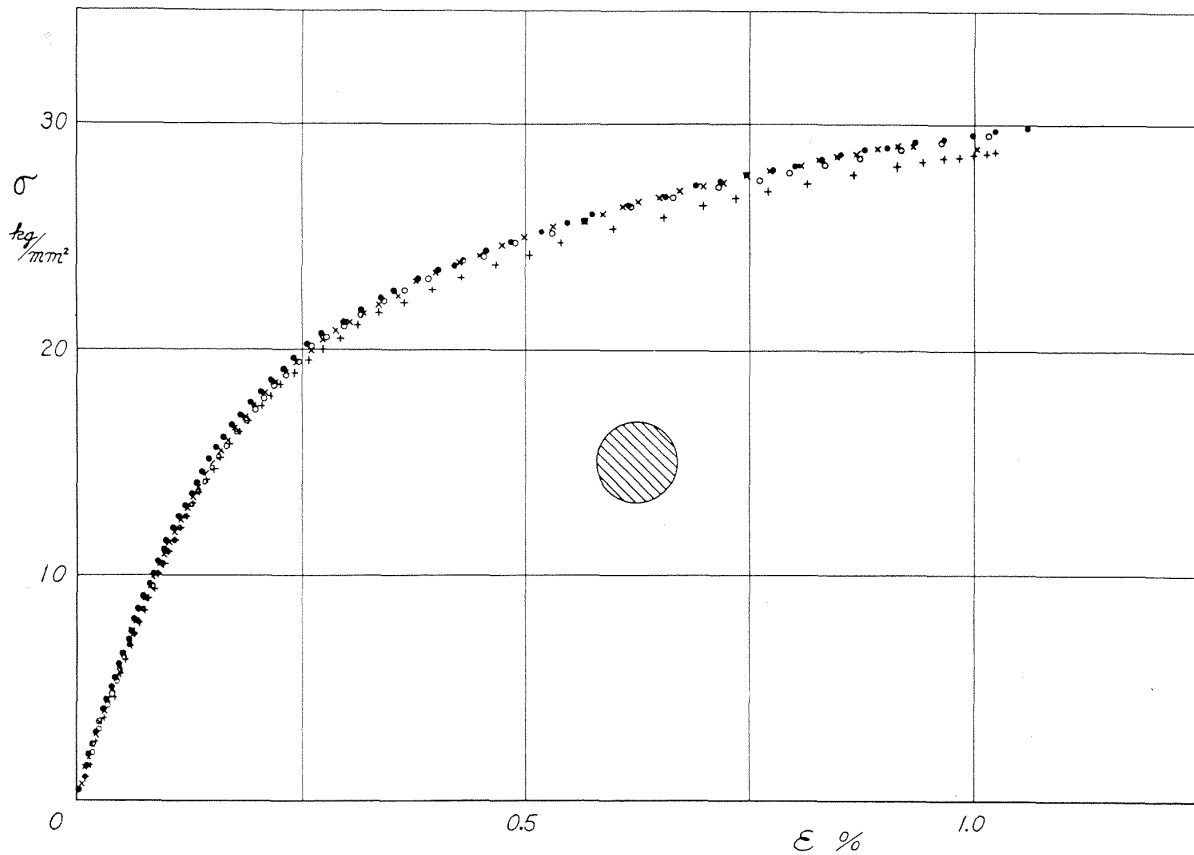
第 1 図

第2図 (a) は鋳物の組織を示した顕微鏡写真であり、(b) は鋳物の引張りによる応力と歪みの関係である。図には4本の試験片による結果が示されているが、いずれもよく一致していて、その破壊は伸び歪みがほぼ1%で応力は平均して 29.5 kg/mm^2 のときに起こっている。

回転試験を行なうにあたって、円板の駆動方法は次のようにして行なった。内径が 20 mm 以上



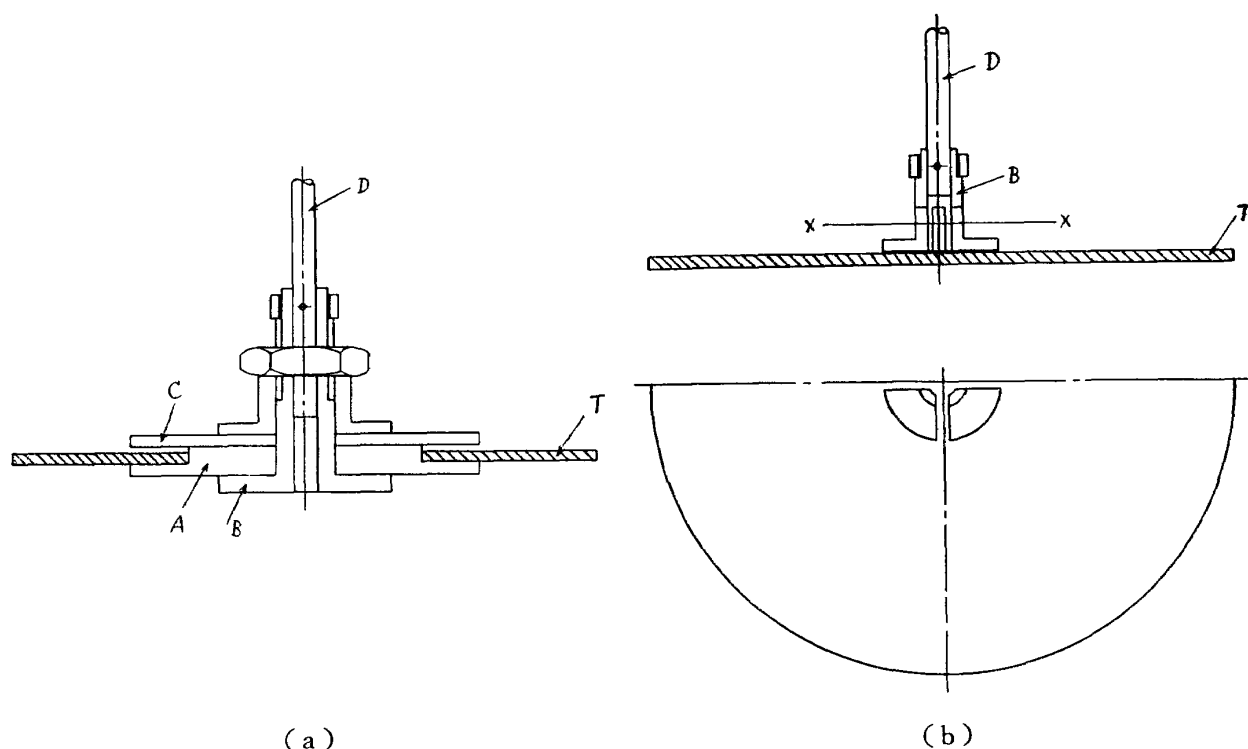
(a)



(b)

第 2 図

の円板では、第 3 図に (a) 示すように、試験円板を段付円板 A の上に乗せて、これとともに回転させることにした。B は段付円板と駆動軸 D を固定するためのアタッチメントであり、円板 C は回転中に試験円板が段付円板 A からはずれて飛び出さないために、蓋の役目をさせたものである。したがって、回転中における試験円板は、段付円板との間の摩擦だけによって、A とともに回転していることになる。中実円板ならびに内径が小さい円板では、(a) に示したような方法では駆動することができない。そこでこの場合には第 3 図 (b) に示すように、試験円板 T の中心に駆動軸 D



第 3 図

を取り付けるためのアタッチメント B を合成樹脂で貼り付けて行なった。アタッチメントに図に示すようなスリットがつけてあるのは、円板が変形したときに、アタッチメントもそれにしたがって、変形ができるようにするための考慮からである。

第 1 表は実験に用いた円板の寸法ならびに実験結果である。円板の表面はグラインダー仕上げをしたものであり、実験では円板が破壊したときの回転数を測定した。表中の

$2r_1$ は円板の内径,

$2r_0$ は円板の外径,

r_1 は円板の内外径比,

n は円板の破壊回転数,

v は円板の破壊時における周速度,

\bar{v} は v の平均値。

一般に内外径比が r_1 である円板が周速度 v で回転しているときの円板の円周応力の平均値 $\bar{\sigma}$ は

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{2} \rho v^2 (1 + r_1 + r_1^2)$$

ただし、 ρ は材料の密度。

円輪の場合は $r_1 = 1.0$ であり、円周応力は均等であるから、円周応力 σ は周速度が v_0 であれば、

$$\sigma = \rho v_0^2$$

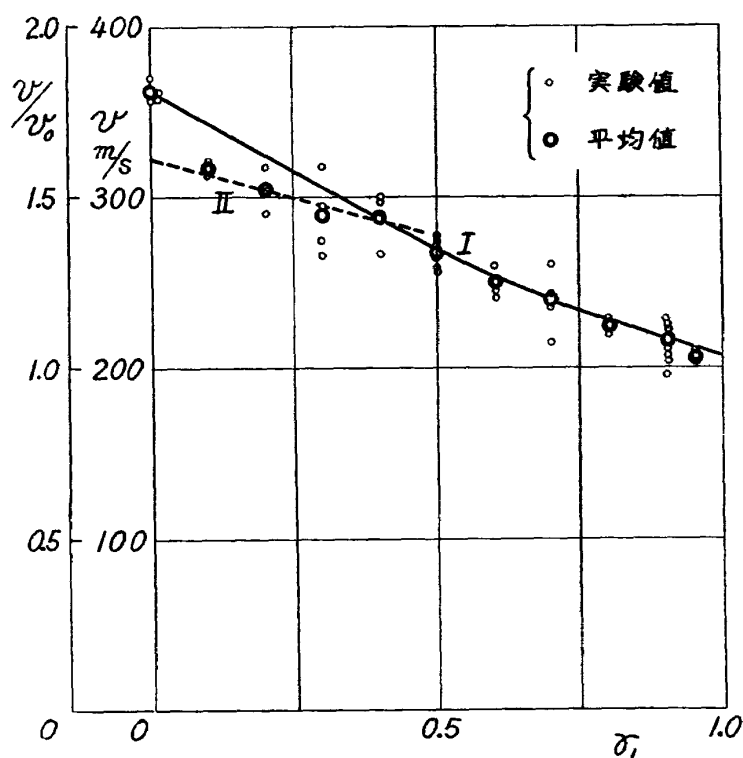
第 1 表中の実験結果の中で、内外径比が $r_1 = 0.90$ と $r_1 = 0.95$ の円板では、半径応力は円周応力

第 1 表

(円板の厚さ 3 mm)

No	$2r_0$ mm	$2r_1$ mm	$\gamma_1 = \frac{r_1}{r_0}$	n rpm	v m/sec	\bar{v} m/sec
1	200	0	0	34.800	364	361
2	"	"	"	34.800	364	
3	"	"	"	34.800	364	
4	"	"	"	34.400	360	
5	"	"	"	34.400	350	
6	200	2.0	0.01	31.400	329	353
7	"	"	"	36.000	377	
8	170	3.5	0.02	38.800	345	346
9	200	4.0	"	32.400	339	
10	"	"	"	30.800	322	
11	"	"	"	36.000	377	
12	200	20	0.10	30.000	314	318
13	"	"	"	30.800	322	
14	"	"	"	30.400	318	
15	202	"	0.099	30.000	317	
16	"	"	"	30.000	317	
17	202	40	0.198	27.600	291	305
18	"	"	"	29.200	308	
19	"	"	"	28.800	304	
20	"	"	"	30.000	317	
21	202	60	0.297	30.000	317	290
22	"	"	"	28.000	296	
23	"	"	"	25.400	268	
24	"	"	"	26.400	279	
25	202	80	0.396	25.200	266	289
26	"	"	"	28.400	300	
27	"	"	"	28.400	300	
28	200	100	0.5	24.400	256	265
29	"	"	"	24.400	256	
30	"	"	"	25.200	264	
31	"	"	"	26.200	274	
32	"	"	"	26.600	279	
33	"	"	"	25.800	270	
34	"	"	"	25.000	262	
35	125	75	0.6	40.400	264	251
36	"	"	"	37.200	243	
37	"	"	"	37.400	245	
38	202	140	0.693	23.200	245	241
39	"	"	"	24.800	262	
40	"	"	"	20.400	216	
41	"	"	"	22.600	239	
42	202	160	0.792	21.800	230	226
43	"	"	"	21.400	226	
44	"	"	"	21.000	222	
45	202	180	0.891	19.400	205	214
46	"	"	"	18.400	195	
47	"	"	"	19.800	209	
48	"	"	"	21.400	226	
49	"	"	"	21.200	224	
50	"	"	"	21.000	222	
51	"	"	0.90	20.200	211	
52	"	"	"	20.800	218	
53	190	180	0.947	21.400	212	207
54	147	140	0.953	26.800	206	
55	"	"	"	26.600	205	
56	"	"	"	26.700	205	

に比べてきわめて小さく、また円周応力の分布はその傾斜はゆるやかなので、その応力状態は円輪と同様に、円周方向への均等引張りであるとみることができる。したがって、これらの円板の強度は円輪の強度と同じであると近似的に考えられる。材料の密度を $\rho=7.3$ として、 $\gamma_1=0.90$ と $\gamma_1=0.95$ の円板の破壊時における円周応力を出して、それらを平均してみると、その値は $\sigma=31$ kg/mm^2 となり、これから円輪の破壊時における周速度をだすと $v_0=204$ m/sec となる。



第 4 図

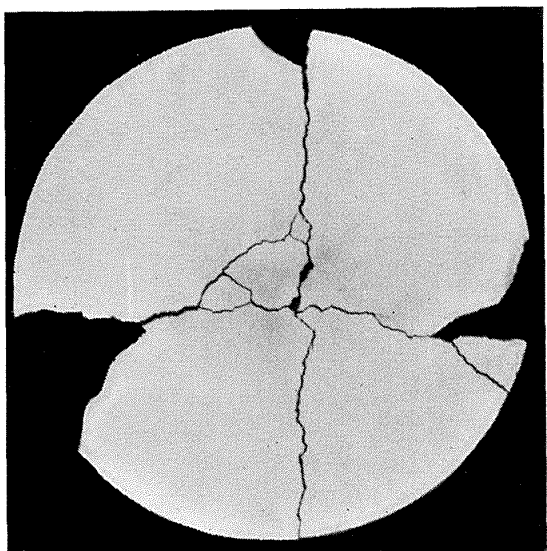
第 4 図は円板の実験結果を示したものであって、破壊時における円板の周速度 v を内外径比 γ_1 に対して画いたものである。また、図の縦軸には円板と円輪の破壊時における周速度の比 v/v_0 の値も記入しておいた。応力状態からみて、円輪の強度は引張りにおけるものと同じである。ここで求めた円輪の強度が、前に引張りから求めた強度とよい一致を示しているのは当然のことである。

第 5 図は円板が破壊した後に破片を集めて示したものである。この写真から、破片の数は円板の内外径比 γ_1 によって異なっていて、 γ_1 の大きいものほどその数は増しており、しかもほぼ同じ間隔で起こっていることがわかる。

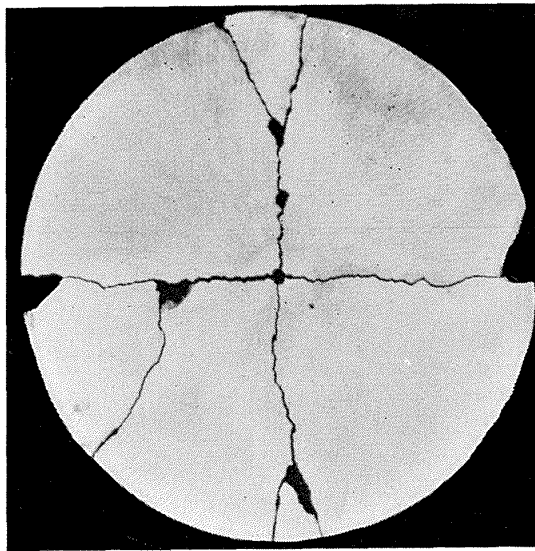
実験結果の考察

鋳鉄円板の実験結果が第 1 表および第 4 図に示すように求められたので、この結果について考察をすることにする。

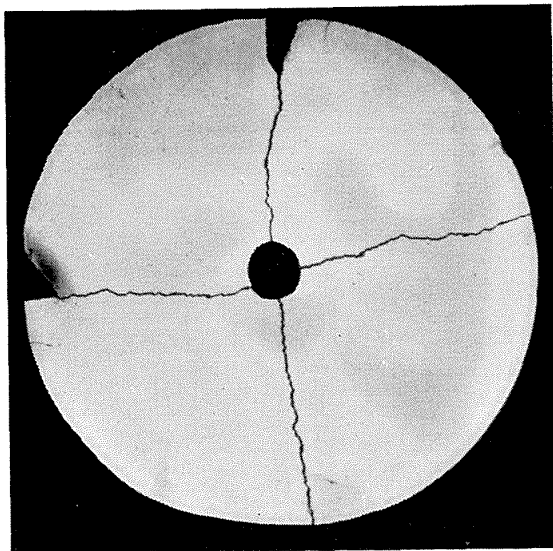
いま、鋳鉄円板の破壊は円周応力の平均値が円輪の強度に達すれば起こるものとすれば、円板の



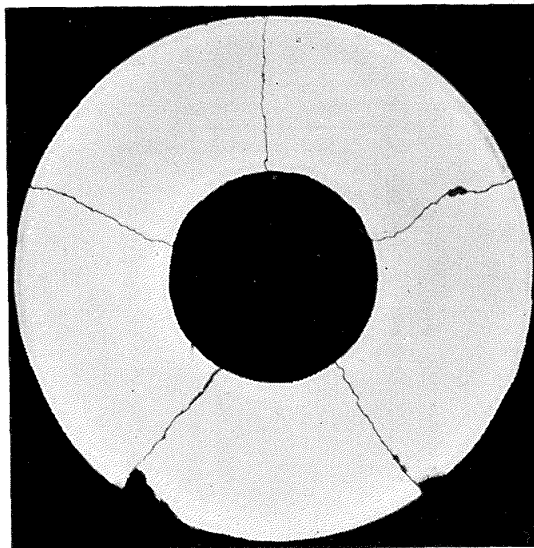
$\gamma_1=0$



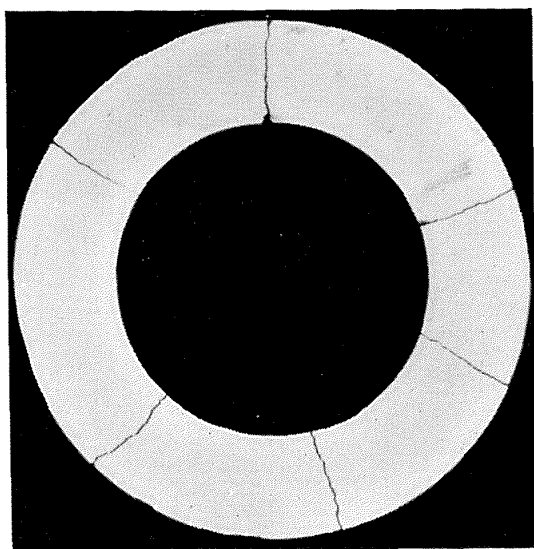
$\gamma_1=0.02$



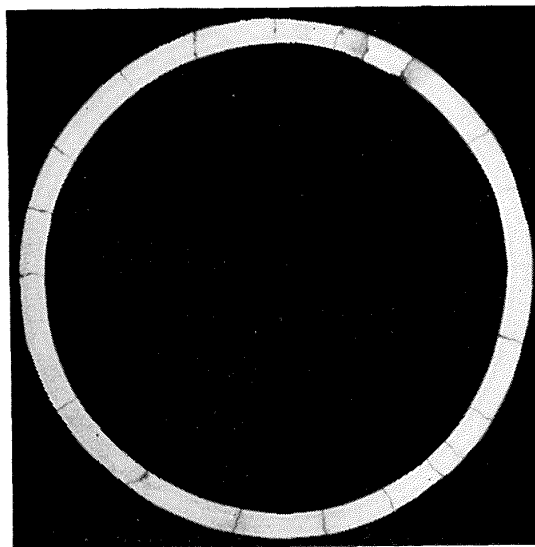
$\gamma_1=0.10$



$\gamma_1=0.4$



$\gamma_1=0.6$



$\gamma_1=0.9$

破壊の条件は

$$\bar{\sigma} = \sigma_b \quad (1)$$

ただし、 $\bar{\sigma}$ は円板の円周応力の平均値、

σ_b は円輪の強度

(1) の関係は平均応力説で破壊が起こるとして、円板の破壊の条件を表わしたものである。破壊がこの条件で起こるということは、破壊は応力の大きい部分の応力のみで決まるものではなくて、応力の小さい部分も考慮に入れた断面全体の応力の平均値によって決まるということである。この意味で、このような条件で起こる破壊は断面全体の問題であるということができる。(1) の条件から円板と円輪が破壊するときの周速度の比を求めると次のようになる。

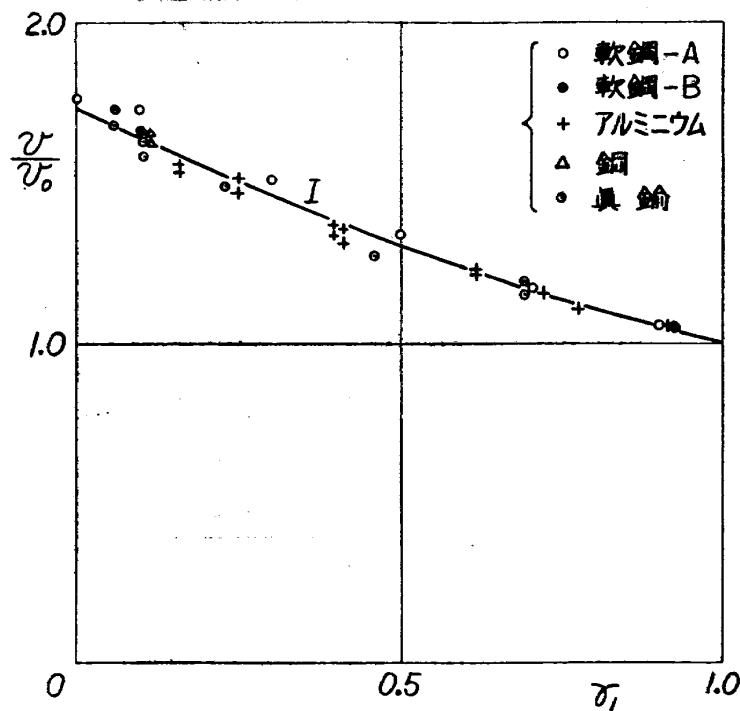
$$\left(\frac{v}{v_0}\right)^2 = \frac{3}{1 + \gamma_1 + \gamma_1^2} \quad (1)'$$

第4図中の曲線Ⅰは(1)'で示された $v/v_0 \sim \gamma_1$ の関係である。実験値と比べてみてわかることは、内外径比 $\gamma_1 > 0.40$ の範囲の円板ならびに中実円板ではこの曲線の上に乗っているが、 $\gamma_1 > 0.40$ の円板では実験値は曲線Ⅰからはずれて、別の曲線Ⅱに移っていることである。円板の応力分布は内外径比 γ_1 によって異なっていて、 γ_1 が大きい円板と中実円板では γ_1 が小さい円板に比べて、円周応力の分布の傾斜はゆるやかである。このことからみて、鑄鉄円板の破壊は応力分布によって異なっていて、その傾斜がゆるやかなときには(1)の条件で起こり、急なときには(1)の条件に達する以前に別の条件で起こるものと思われる。

鑄鉄の破壊は断面全体の問題であって、応力の平均値——単なる平均値ではなくて、付重平均値——が一定のところで起こるということは、矩形梁の曲げ⁽¹⁾、円筒の捩り⁽²⁾によってすでに確められている。しかし、ここで示した実験では鑄鉄の破壊は応力分布の影響をうけて、断面全体の問題で起こるものとそうでないものとの二種類があることを示している。このほか、鑄鉄円板の実験結果で興味あることは、内径がきわめて小さい円板では応力分布の傾斜は急であるにもかかわらず、その破壊は(1)の条件で起こっていることである。これらの応力分布と強度の関係については、これから検討をしていくつもりである。

応力分布の影響 中空円板における応力分布の傾斜は、材料が同じならば内外径比 γ_1 が小さいほど急であるが、 γ_1 が大きくなるにしたがってゆるやかになる。しかし、材料の延性が異なる場合には、たとえ内外径比が同じ円板であっても、円板における応力分布の傾斜は伸びの小さい材料からなる円板ほど急になる。幸い、延性材料からなる円板の回転強度⁽³⁾も、軟鋼円板の回転による降伏⁽³⁾⁽⁴⁾もすでに研究を行なっているので、これらの結果から第4図に示した鑄鉄円板の応力分布と強度の関係を考察することにしよう。

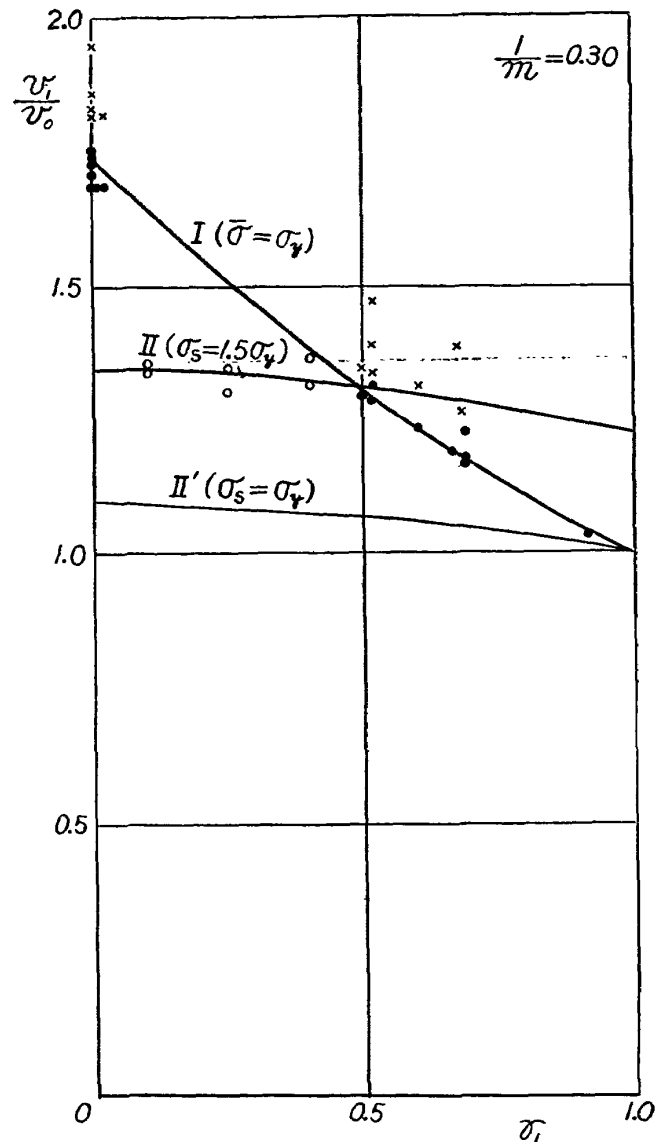
第6図は軟鋼、アルミニウム、銅および真鍮からなる円板の破壊に関する実験結果であり、第7図は軟鋼円板の降伏に関する実験結果である。いずれも縦軸および横軸には第4図と同様に v/v_0



第 6 図

と円板の内外径比 r_1 が採ってある。ここに、 v および v_0 は、第 6 図では円板および円輪が破壊するときの周速度であり、第 7 図では円板および円輪が降伏するときの周速度である。また、図中の曲線 I は (1)' で示された $v/v_0 \sim r_1$ の関係を示したものであって、これは円板の破壊ならびに降伏が断面全体の問題で起こるときとの関係である。第 6 図の延性材料からなる円板では、内外径比 r_1 の値にかかわらず、すべての実験値は曲線 I の上に乗っていて、円板の破壊は断面全体の問題で起こっている。第 7 図の軟鋼円板の降伏では、降伏は円板の内外径比 r_1 によって異なっていて、 $r_1 > 0.50$ の範囲の円板と $r_1 = 0$ の中実円板の実験値は曲線 I の上に乗っていて、降伏は断面全体の問題で起こっているが、 $r_1 < 0.50$ の円板の実験値は別の曲線 II の上に乗っている。実験では、曲線 I で降伏が起こったものは、降伏は回転一定で円板の内周から外周に拡がり、降伏が曲線 II で起こったものは、降伏は円板の内周部のみで局部的に起こり、その後は回転を増さなければ降伏は拡がらないことが観察されている。円板の降伏がこのような起こるのは、実は軟鋼の降伏には断面全体で起こるものと局部的に起こるものの二種類があって、応力分布の傾斜が割りにゆるやかな場合には前者が起こり、急な場合には後者が起こるからである。また、降伏の条件もよくわかっている⁽⁵⁾。第 7 図の曲線 II は降伏が局部的に起こるときとの条件から求めた $v/v_0 \sim r_1$ の関係を示したものである。

第 6 図と第 7 図を比べてみてわかることは、延性材料の破壊はすべて断面全体の問題で起こっているが、軟鋼の降伏には、断面全体の問題で起こるもののほかに、局部的に起こる降伏が起こっているということである。これは延性材料からなる円板では破壊するまでにかなりの塑性変形をする

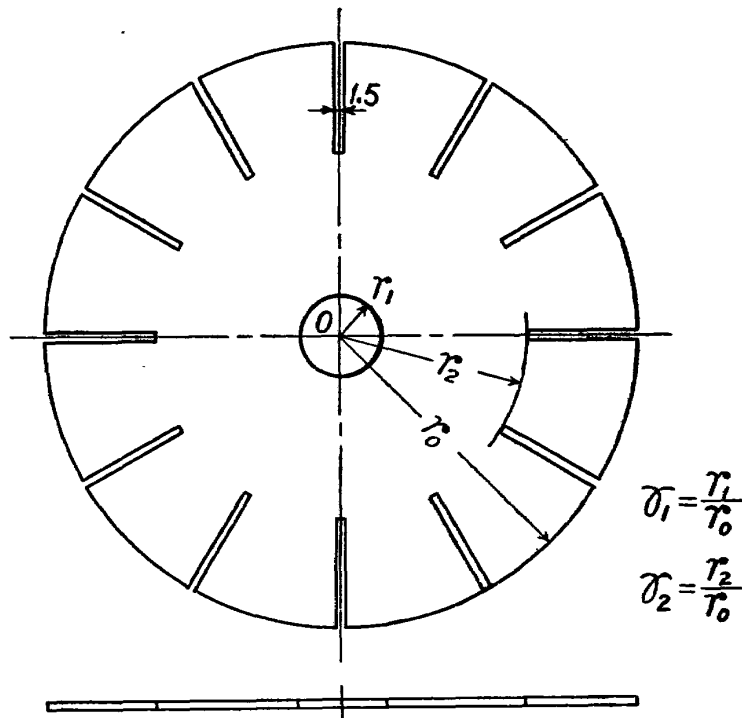


第 7 図

ために、その応力分布の傾斜は軟鋼円板の降伏点におけるものに比べて、ゆるやかになっているためであると思われる。引張りによる伸び歪みの点からいえば、鑄鉄が破壊するときの歪みは延性材料におけるものよりは小さいが、軟鋼の降伏点におけるものよりは大きい。このことからみて、第 4 図の曲線Ⅱで起こっている鑄鉄円板の破壊は、軟鋼円板の降伏において局部的に起こっているものに相当したものであることは間違いないと思われる。すなわち、鑄鉄のような脆性材料の破壊は、軟鋼の降伏と同様に応力分布によって、断面全体で起こるものと局部的に起こるものとの二種類があるものと考えられる。また、この局部的に起こる破壊は延性材料からなる円板では認められていないことからみて、材料の延性をある程度増して、破壊するときの応力分布の傾斜をゆるやかにしてやれば、この種の破壊は起こらなくなるものと思われる。一般に構造物では材料の欠かんによる強度の低下を防ぐために、材料にある程度以上の伸びがあることを要求されているが、これはまたここでいう局所的な条件で起こる破壊をさけるためにも役立っていることである。

鋳鉄の局部的破壊 鋳鉄の破壊には断面全体で起こるもののほかに、局部的に起こるものがあるということは、非常に興味あるとともに工学上重要なことであるので、このことを他の実験によってさらに確かめておこうと思う。

実験は第8図に示すように、内半径が r_1 、外半径が r_0 の鋳鉄円板の外周に細いスリットを付けた円板について、回転試験を行なったものである。第8図に示したような円板はガスタービンや軸流圧縮機における翼車の模型として考えることができる。その理由は、内半径が r_1 、外半径が r_2



第 8 図

である円板は翼車における車盤に対応しており、スリットを切った $(r_0 - r_2)$ の部分は翼に対応しており、しかもこのようにして作った翼車では翼の回転による遠心力は、実際の翼車におけると同様に、外圧として車盤に作用しているとみなされるからである⁽⁶⁾。

第2表は実験に用いた翼車の寸法ならびに実験結果である。ここで用いた材料は第1表に示した円板と同じ鋳物であって、第2表中の n および v はそれぞれ破壊回転数であり、そのときの周速度である。試験翼車にはスリットの切り込みの深さが変えてあるので、この実験では翼の回転による遠心力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。第9図は縦軸に v/v_0 を採り横軸の翼の長さを表わす量 $r_2 = r_2/r_0$ を採って示した実験結果である。 $r_2 = 1.0$ というのは翼をもたない元の円板のことであって、これらの実験値は第1表ならびに第4図にすでに示したものと同じである。また、第10図は実験に用いた翼車の破壊例を示したものである。

車盤における応力分布は、車盤それ自身の回転によるものと翼の回転による遠心力が外圧として車盤に作用するものとの重畳である。翼の遠心力によって車盤に誘起される応力は、車盤が $r_1 = 0$

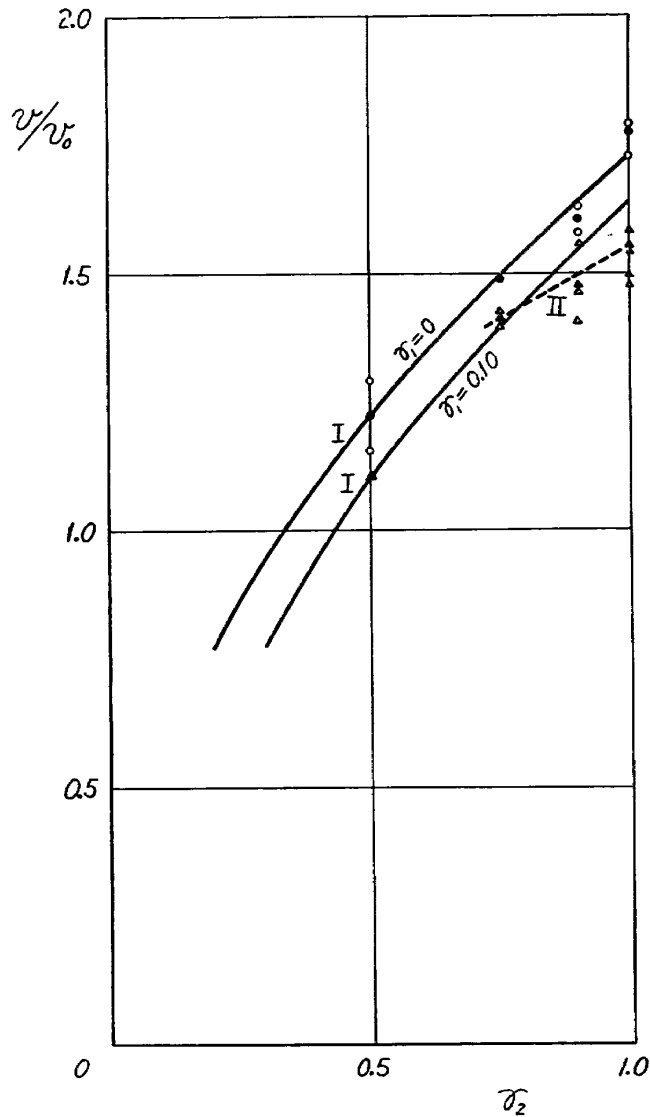
第 2 表

(円板の厚さ 3 mm)

No	$2r_0$ mm	$2r_1$ mm	$2r_2$ mm	$\gamma_1 = \frac{r_1}{r_0}$	$\gamma_2 = \frac{r_2}{r_0}$	n rpm	v m/sec	\bar{v} m/sec
1	200	0	200	0	1.0	34.800	364	361
2	"	"	"	"	"	34.800	364	
3	"	"	"	"	"	34.800	364	
4	"	"	"	"	"	34.400	360	
5	"	"	"	"	"	33.400	350	
101	200	0	180	0	0.90	30.600	320	325
102	"	"	"	"	"	31.000	324	
103	"	"	"	"	"	31.600	331	
104	200	0	150	0	0.65	28.800	302	302
105	"	"	"	"	"	28.800	302	
106	200	0	100	0	0.50	22.400	234	248
107	"	"	"	"	"	25.000	262	
12	200	20	200	0.10	1.0	30.000	314	318
13	"	"	"	"	"	30.800	322	
14	"	"	"	"	"	30.400	318	
15	202	"	202	0.099	"	30.000	317	
16	"	"	"	"	"	30.000	317	
201	202	20	180	0.099	0.891	27.000	285	300
202	"	"	"	"	"	28.200	298	
203	"	"	"	"	"	30.000	317	
204	202	20	150	0.099	0.742	27.400	290	287
205	"	"	"	"	"	26.800	283	
206	202	20	100	0.099	0.495	21.400	226	225
207	"	"	"	"	"	21.200	224	

の中実円板では半径応力も円周応力も均等であって、相等しい。したがって、車盤が中実円板であるときにはそれに翼を付けることによって、車盤の応力分布は車盤自身の回転によるものよりも、その傾斜はゆるやかになる。一般に、車盤が中空円板である場合でも、その外周に付ける翼の長さを増して、いいかえれば車盤に作用する外圧を大きくしてやれば、車盤の応力分布は車盤自身の回転によるものよりもその傾斜はゆるやかになる。したがって、中実円板に翼を付けた翼車における車盤の破壊は断面全体の問題で起こり、そのときの条件は(1)で与えられるはずである。その理由は、中実円板自身の破壊は、第4図に示したように、すでに断面全体の問題で起こっており、それに外圧が作用すれば車盤の応力分布はさらにゆるやかになるからである。これに対して、 $\gamma_1=0.10$ の中空円板の外周に翼を付けたものの破壊は、翼の長さを増すにしたがって、局所的な条件で起こる破壊から断面全体の問題で起こる破壊に移っていくものと考えられる。その理由は、 $\gamma_1=0.10$ の中空円板自身の破壊は第4図に示すように、局所的な条件で起こっているが、翼の長さを増して車盤に作用する外圧を増してやれば、車盤の応力分布は次第にその傾斜がゆるやかになるからである。

第9図中の2本の実線は、それぞれ内外径比が $\gamma_1=0$, $\gamma_1=0.10$ の翼車の破壊が(1)の条件で



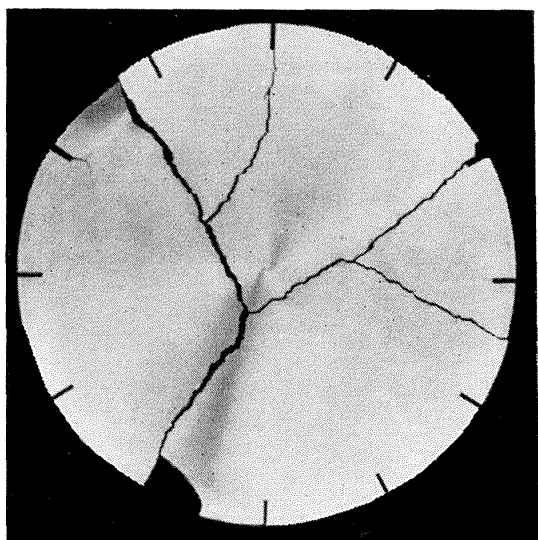
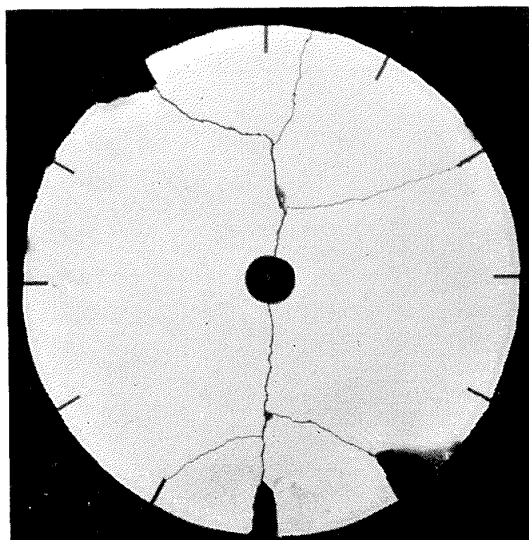
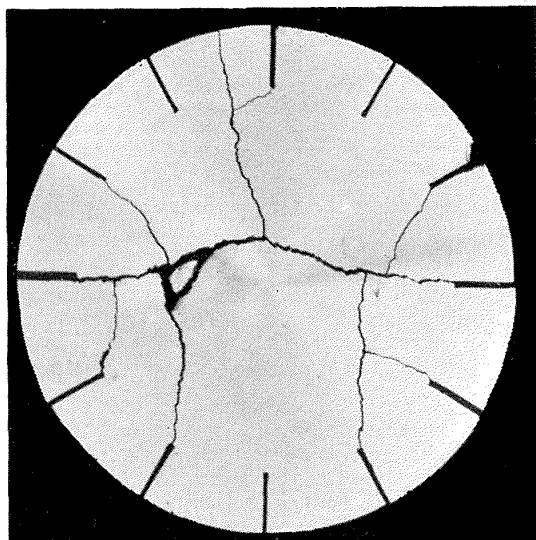
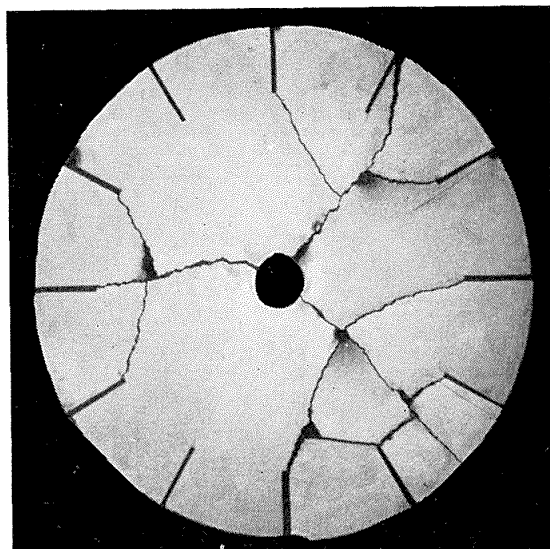
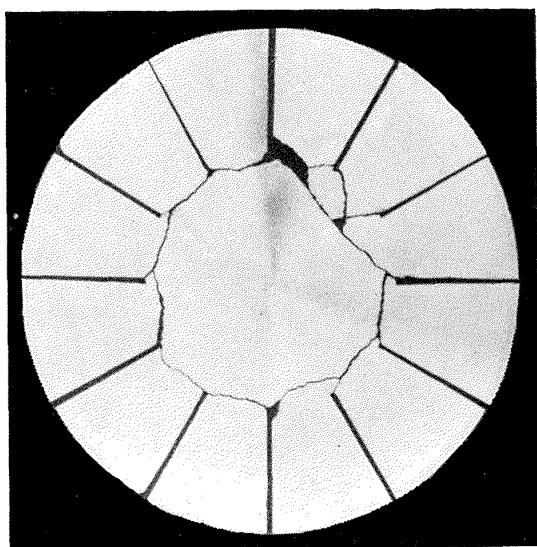
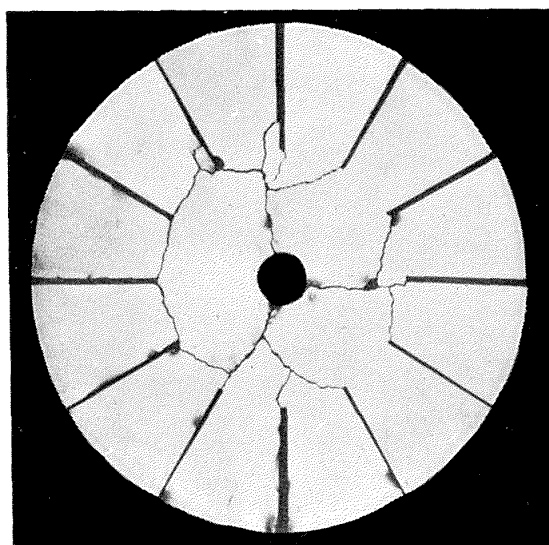
第 9 図

起こるものとして求めた $v/v_0 \sim r_2/r_1$ の関係である*。翼車が中実円板からなるときの実験値は、翼の長さにかかわらず、すべてこの曲線の上に乗っていて、上で推察したとおりにでている。また、翼車が $r_1=0.10$ の中空円板からなるときの実験値は、初めは曲線Ⅱに乗っているが、翼の長さを増すにしたがって、曲線Ⅱから曲線Ⅰに移行して、その後は曲線Ⅰに乗っている。曲線Ⅱは $r_2=1.0$ の実験値、すなわち $r_1=0.10$ の元の円板の実験値を満足する曲線であることからみて、この曲線Ⅱで起こっている翼車の破壊は第4図の曲線Ⅱで起こっている円板の破壊と同じように、局所的な条件で起こっている破壊であると考えられる。したがって、 $r_1=0.10$ の円板からなる翼車におけ

* 第9図に曲線Ⅰで示した $v/v_0 \sim r_2/r_1$ の関係は次式で与えられる。

$$\left(\frac{v}{v_0}\right)^2 = \frac{3(r_2 - r_1)}{1 - r_1^3}$$

実験に用いた翼車では円板の外周にスリットが切ってある。しかし、スリットの幅は細いので、上式ではこのスリットを切ったことによる質量の減少は省略して、回転による翼の遠心力は計算してある。

 $\gamma_2=0.9$  $\gamma_2=0.9$  $\gamma_2=0.75$  $\gamma_2=0.75$  $\gamma_2=0.5$  $\gamma_2=0.5$

第 10 図

る車盤の破壊についても上で推察したとおりにでていて、鑄鉄の破壊には断面全体の問題で起こるもののほかに、局所的な条件で起こるものがあることを示している。

脆性材料からなる円板の実験としては、石膏ならびに黒鉛についての実験⁽⁷⁾がある。それによると、破壊はほぼ(1)の条件で起こっているといっている。しかしよくみれば、その結果においても、第4図の曲線Ⅱに相当する破壊が認められる。また、中西は鑄鉄のような脆性材料の破壊には、軟鋼の降伏と同様に、断面全体の問題で起こるもののほかに、応力分布の傾斜が急な場合には局所的な条件で起こるものがあるはずであるといっている⁽⁸⁾。そして、Holms らの実験⁽⁹⁾の中で、伸びの小さいベリリウム銅の破壊が(1)で表わされる強度よりも下にでているのをみて、これは局所的な条件で起こった破壊であろうといっている。

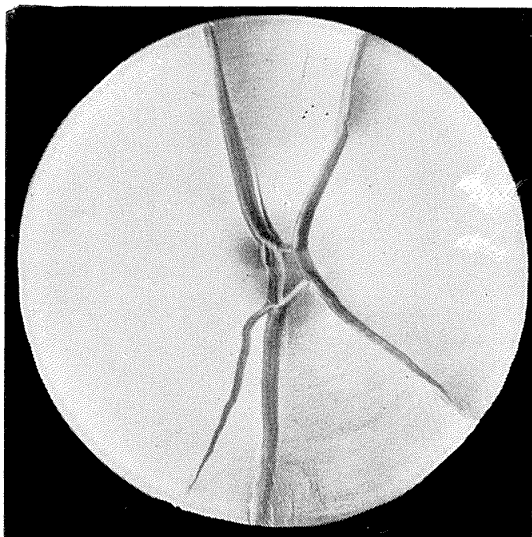
以上述べた実験、考察ならびに他の研究者による研究からみて、鑄鉄のような脆性材料の破壊には、断面全体の問題で起こるものと局所的な条件で起るものがあることは間違いない。

内外径比 r_1 がきわめて小さい円板の強度 この場合の円板の応力分布は中実円板の中心に小孔をあけて鋭い応力の集中を起こさせたものと同じである。したがって、破壊は局所的な条件で起こるはずである。しかし、実験ではそうはならないで、実験値は第4図にみるように、曲線Ⅰに乗っていて破壊は断面全体の問題で起こったことを示している。このことは、一種の寸法効果を示すものであると思われるが、応力分布が鑄鉄の破壊に及ぼす影響について、今まで述べてきたことと矛盾することである。

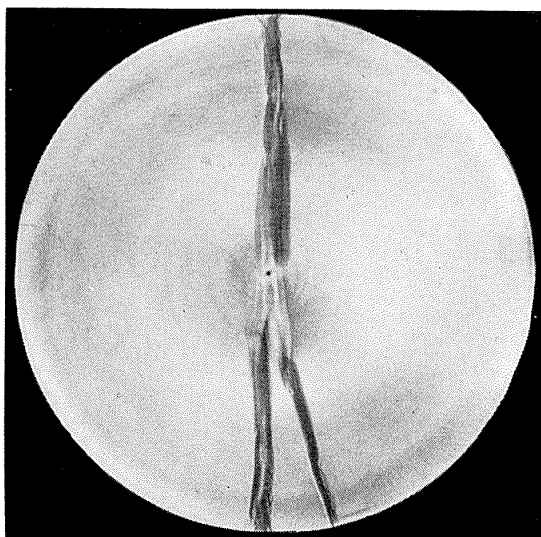
鑄鉄の破壊における矛盾と同じ矛盾は第7図に示した軟鋼円板の降伏においても認めることができる。第11図(a)および(b)は中実円板と内外径比 $r_1=0.006$ の円板が降伏をしたときの降伏による歪み模様(strain figure)を示したものである。これらの歪み模様は、いずれも円板の周速度が $v/v_0=1.73$ に達したときに初めて認められたものであって、降伏は断面全体の問題で起こったことを示している。中実円板の応力分布はその傾斜が割りにゆるやかであるので、降伏は断面全体の問題で起こるのは当然のことである。しかし、 $r_1=0.006$ の円板では内径の周りに鋭い応力集中が起こっているので、降伏は局所的な条件で起こり、歪み模様は(c)に示した円板のように、最初内周部にでて、その後は回転を上げなければ進行しないはずである*。しかし実験ではそのようにでない。

鋭い応力の集中があるときの軟鋼の降伏には、その応力の集中は効かないで断面全体の問題で起こることについては、すでに研究が行なわれている⁽¹⁰⁾。その研究結果を軟鋼円板の回転による降伏に適用して述べれば次のようになる；——軟鋼のような多結晶材料では、応力は結晶相互の干渉によって支持されるものであるが、円板の内径の周辺にある結晶は顔を半分内周に出しているもの

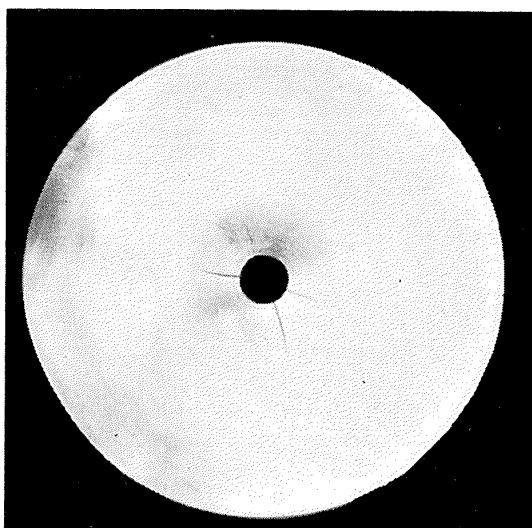
* (c) に示した写真は、円板の回転を上げて降伏を進行させている途中の状態であるが、最初に降伏を認めたときには、その降伏は円板の内周部のみで起こっていたものである。



(a) $\gamma_1 = 0$
 $v/v_0 = 1.73$

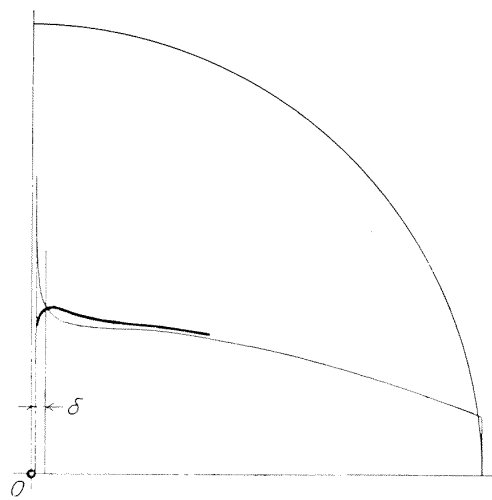


(b) $\gamma_1 = 0.006$
 $v/v_0 = 1.73$

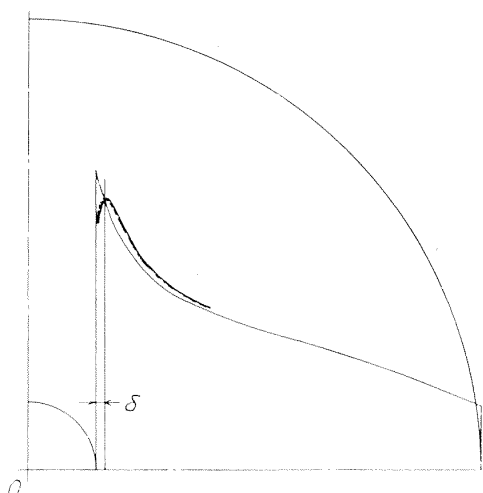


(c) $\gamma_1 = 0.10$

第 11 図



(a)



(b)

第 12 図

もあるので、結晶相互の干渉は周囲が他の結晶に囲まれた部分のものよりも弱い。したがって、中空円板の弾性域における応力分布は、実際には弾性理論が示すようにはならないで、第 12 図で示すようになる。図中の δ は結晶の干渉が弱い範囲を示すものであって、原著者はこれを表面層と名付けていて、その厚さは材料について一定で、結晶の大きさでいって、結晶数個の大きさに相当した程度のものであると述べている。第 12 図の (a) および (b) は内外径比がきわめて小さい円板とそれよりも少し大きい円板について応力分布を示したものであって、細線は弾性理論が示す応力分布であり、太線は表面層の影響を考慮に入れて示した応力分布である。表面層を考えに入れた応力分布は弾性理論が示す応力分布の傾斜によって異なり、(a) では非常にゆるやかになっているが、(b) では弾性理論が示すものとほとんど同じであるとみられる。第 11 図に示した実験で第 12 図 (a) で示したような内外径比の円板の降伏が断面全体の問題で起こり、(b) に示したような円板では局部的な条件で起こっているのは、このためである。

内外径比がきわめて小さい鑄鉄円板の破壊が、局部的な条件で起こらずに、断面全体の問題で起こっているのは、鑄鉄にも上で述べた表面層に相当したものと考えると考えざるを得ない。表面層があるということは、それによる寸法効果があるということである。

結 論

この論文では、鑄鉄円板の実験ならびに考察から、鑄鉄のような脆性材料からなる破壊には、軟鋼の降伏と同様に、断面全体の問題で起こるものと局部的な条件で起こるものの二種類があって、前者は応力分布の傾斜が割りにゆるやかなときに起こり、後者は割りに急なときに起こることを述べた。また、内外径比がきわめて小さい鑄鉄円板には鋭い応力の集中があるにもかかわらず、破壊にはその影響がでていないことについては、鑄鉄にも結晶の干渉の弱い表面層に相当したものと考えると考えた。これらのことは、構造物の形と強度の関係を定める上に重要なことである。問題は破壊の条件であるが、断面全体の問題で起こるものについてはよくわかっているが、局部的に起こるものについては、今のところよくわからないので、今後の研究にまたなければならない。

内外径比が 1 に近い円板の応力状態は、近似的には円周方向への均等引張りであるので、破壊は最初に 1 カ所で起こることは間違いない。しかし、第 5 図の破壊後の写真からみると、破片の数は円板の内外径比の大きいものほど多くて、しかも、その破片の長さはほぼ同じ長さになっている。このことについては、破壊するときの瞬間写真を撮って目下研究中である。

終りにのぞみ、終始御指導と御討論を賜わった中西不二夫先生に深く感謝の意を捧げる次第である。また、実験のために鑄鉄の素材ならびに円板を提供して下さった神戸製鋼所の亀岡実験部長に厚く御礼を申し上げる次第である。さらに実験を手伝ってくれた実験室の太田泰正君、神保勝久君ならびに渡辺一郎君らにも感謝の意を表する次第である。

文 献

- (1) 中西不二夫: 機械学会論文集, 18 卷, 68 号 (昭 27)
- (2) 中西不二夫: // , 18 卷, 65 号 (昭 27)
- (3) 佐藤和郎: 航空学会誌, 10 卷, 105 号 (昭 37)
- (4) 佐藤和郎, 永井文雄: 航空技術研究所報告, TR-11 (昭 36)
- (5) 中西不二夫: 機械学会誌, 53 卷, 374 号 (昭 25)
- (6) 佐藤和郎, 永井文雄: 航空技術研究所報告, TR-19 (昭 36)
- (7) 鶴戸口英善: 機械の研究, 5 卷, 1 号 (昭 28).
- (8) 中西不二夫: 機械学会論文集, 18 卷, 75 号 (昭 27)
- (9) A. G. Holms and J. E. Jenkins. NACA. TN. No. 1667 (1943)
- (10) 中西不二夫: 機械学会論文集, 19 卷, 87 号 (昭 28)

<p>NAL TR-38 航空技術研究所 鋳鉄のような脆性材料からなる円板の回転強度</p> <p>1963 年 1 月 18 ページ</p> <p>この論文は鋳鉄円板の回転による破壊強度に関する実験ならびに考察を述べたものであって、次のような結論が得られている。 鋳鉄のような脆性材料の破壊は軟鋼の降伏と同様に応力分布の影響をうけていて、軟鋼の降伏の仕方に2種類の仕方があり同様に脆性材料の破壊の仕方に2種類ある。その一つは応力分布の傾斜が割りにゆるやかな場合である。このときの破壊は断面全体の問題であって、円周応力の平均値が円輪の強度に達したときに起こる。もう一つは応力分布の傾斜が割りに急なときに起こる破壊であって、このときには応力最大の部分で局部的に起こる。</p>	<p>I. 佐藤和郎 永井文雄 II. NAL TR-38 III. 539.4.012 621-25</p>	<p>NAL TR-38 航空技術研究所 鋳鉄のような脆性材料からなる円板の回転強度</p> <p>1963 年 1 月 18 ページ</p> <p>この論文は鋳鉄円板の回転による破壊強度に関する実験ならびに考察を述べたものであって、次のような結論が得られている。 鋳鉄のような脆性材料の破壊は軟鋼の降伏と同様に応力分布の影響をうけていて、軟鋼の降伏の仕方に2種類の仕方があり同様に脆性材料の破壊の仕方に2種類ある。その一つは応力分布の傾斜が割りにゆるやかな場合である。このときの破壊は断面全体の問題であって、円周応力の平均値が円輪の強度に達したときに起こる。もう一つは応力分布の傾斜が割りに急なときに起こる破壊であって、このときには応力最大の部分で局部的に起こる。</p>	<p>I. 佐藤和郎 永井文雄 II. NAL TR-38 III. 539.4.012 621-25</p>
<p>NAL TR-38 航空技術研究所 鋳鉄のような脆性材料からなる円板の回転強度</p> <p>1963 年 1 月 18 ページ</p> <p>この論文は鋳鉄円板の回転による破壊強度に関する実験ならびに考察を述べたものであって、次のような結論が得られている。 鋳鉄のような脆性材料の破壊は軟鋼の降伏と同様に応力分布の影響をうけていて、軟鋼の降伏の仕方に2種類の仕方があり同様に脆性材料の破壊の仕方に2種類ある。その一つは応力分布の傾斜が割りにゆるやかな場合である。このときの破壊は断面全体の問題であって、円周応力の平均値が円輪の強度に達したときに起こる。もう一つは応力分布の傾斜が割りに急なときに起こる破壊であって、このときには応力最大の部分で局部的に起こる。</p>	<p>I. 佐藤和郎 永井文雄 II. NAL TR-38 III. 539.4.012 621-25</p>	<p>NAL TR-38 航空技術研究所 鋳鉄のような脆性材料からなる円板の回転強度</p> <p>1963 年 1 月 18 ページ</p> <p>この論文は鋳鉄円板の回転による破壊強度に関する実験ならびに考察を述べたものであって、次のような結論が得られている。 鋳鉄のような脆性材料の破壊は軟鋼の降伏と同様に応力分布の影響をうけていて、軟鋼の降伏の仕方に2種類の仕方があり同様に脆性材料の破壊の仕方に2種類ある。その一つは応力分布の傾斜が割りにゆるやかな場合である。このときの破壊は断面全体の問題であって、円周応力の平均値が円輪の強度に達したときに起こる。もう一つは応力分布の傾斜が割りに急なときに起こる破壊であって、このときには応力最大の部分で局部的に起こる。</p>	<p>I. 佐藤和郎 永井文雄 II. NAL TR-38 III. 539.4.012 621-25</p>

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, 塙 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 Reported Load Testing Rigs for Full Scale Aircraft Wing Structures	1962年12月	竹内和之, 飯田完四郎 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	松田 勇, 松崎利一
TR-37T	Studies of the Flow in a Low Pressure Hypersonic Shock Tunnel Using an Electron-Beam Densitometer	January 1963	Isamu Wada

航空技術研究所報告 38 号

昭和 38 年 1 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