

# Fixed Type Cavitation による金属の損傷

藤 間 孝 義\*

## Metallic Damage Caused by Fixed Type Cavitation

By Takayoshi Thoma  
Hitachi Research Laboratory, Hitachi, Ltd.

### Abstract

The article describes damages caused on metals by the severe cavitation generally classified as fixed type, and the results of experimental investigations in the erosion mechanism in relation to the above metallic damage.

In his experiment, the fixed type cavitation was reproduced by the vibration method in which the magneto-strictive effect of an Ni rod is utilized, and several metals and other materials such as Al-bronze, austenite stainless steel, bakelite, and glass were subjected to tests. For studying the collapse process of fixed type cavity and several problems related to it the writer resorted to the high speed pictures taken with spark flash which respresented this process in detail.

### 〔I〕 緒 言

キャビテーション（空洞現象）による金属の損傷はキャビテーションエロージョン（Cavitation Erosion）、潰蝕または壊蝕と呼ばれているが、最近<sup>(1)~(8)</sup>この問題に対する各方面の関心は特にたかまつている。

金属の損傷をもたらすこのキャビテーションは、一般にフィックスドタイプ（Fixed Type）とトラベリングタイプ（Travelling Type）とに区分して考えられており、特に前者が材料使用上有害<sup>(5)</sup>とされている。

従来これらの損傷に対する金属の相対的な強さ（以下耐潰蝕性と略称する）の研究には多くの方法<sup>(5)~(15)</sup>が用いられて来たが、中でも磁歪現象を利用した振動法<sup>(12)~(15)</sup>は良好な再現性を与えるものとして内外の研究者によつて広く奨用されている。筆者は特に強いフィックスドタイプのキャビテーションをこの方法により再現して、各種の実験を行つているが、ここではこれによる数種の材料についての実験例と、その損傷機構考察のための実験とについて報告するとともに、これらに関する二三の知見を述べる。

### 〔II〕 試験方法と設備の概要

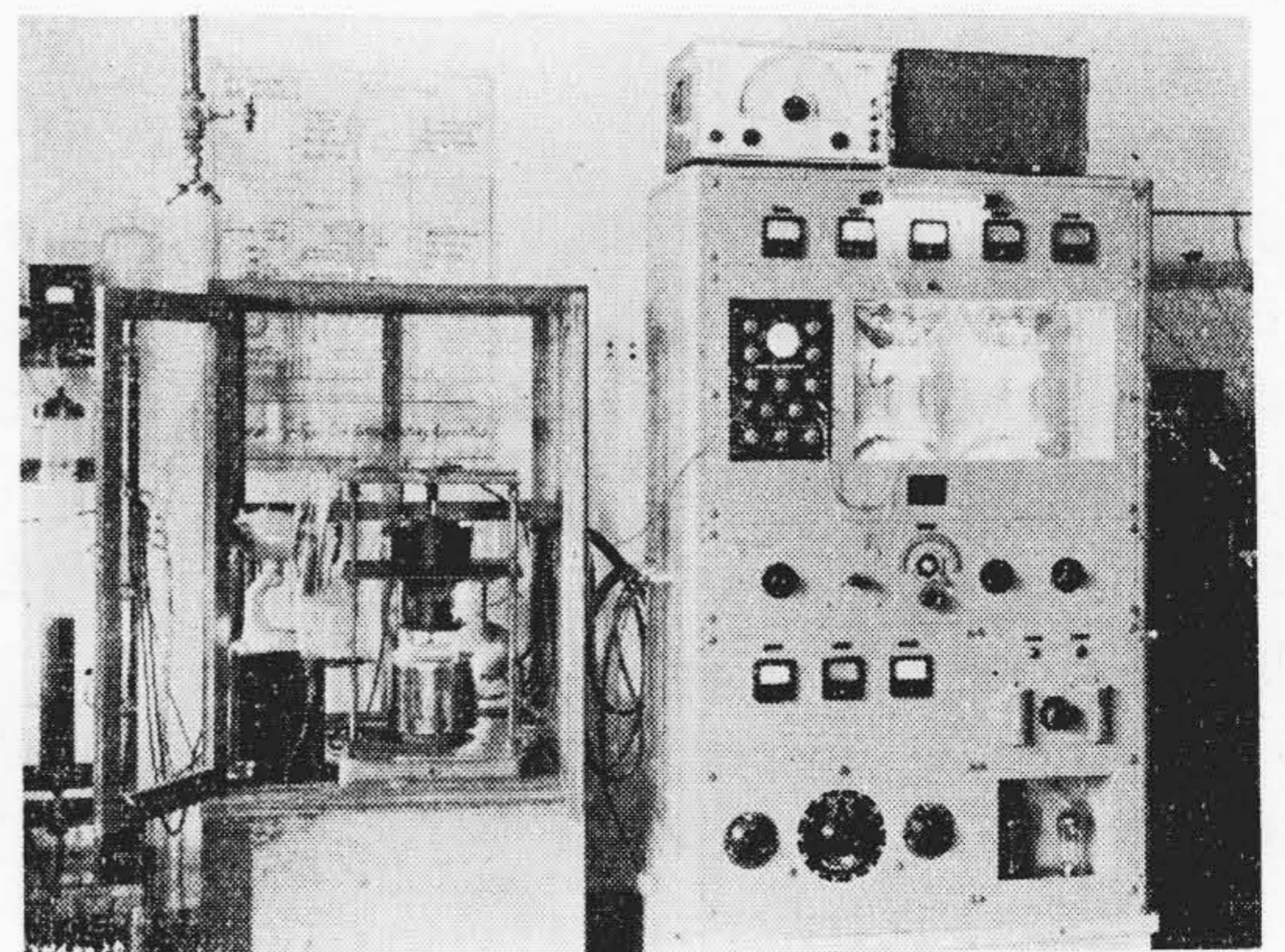
#### （1）試験法の原理

ニッケル、鉄、アルフェルなどの特殊な強磁性金属はよく知られているように磁化に応じて伸縮する。これは

磁歪現象の一つでジュール効果と呼ばれているが、この効果を利用して電氣的なエネルギーを機械的な振動に変換し、振動子の端部に固定した試験片を水中で駆動すると、試験面下部における水圧の急変によつて潰蝕を伴う強烈なキャビテーションを発生<sup>(16)</sup>する。このキャビテーションは振動条件を必要な精度で監視、調整することにより良好な再現性が期待できる。そこで、一定条件で試験してえられる重量の減少ならびに面の潰蝕特況を比較することにより、材料の耐潰蝕性を評価することができる。

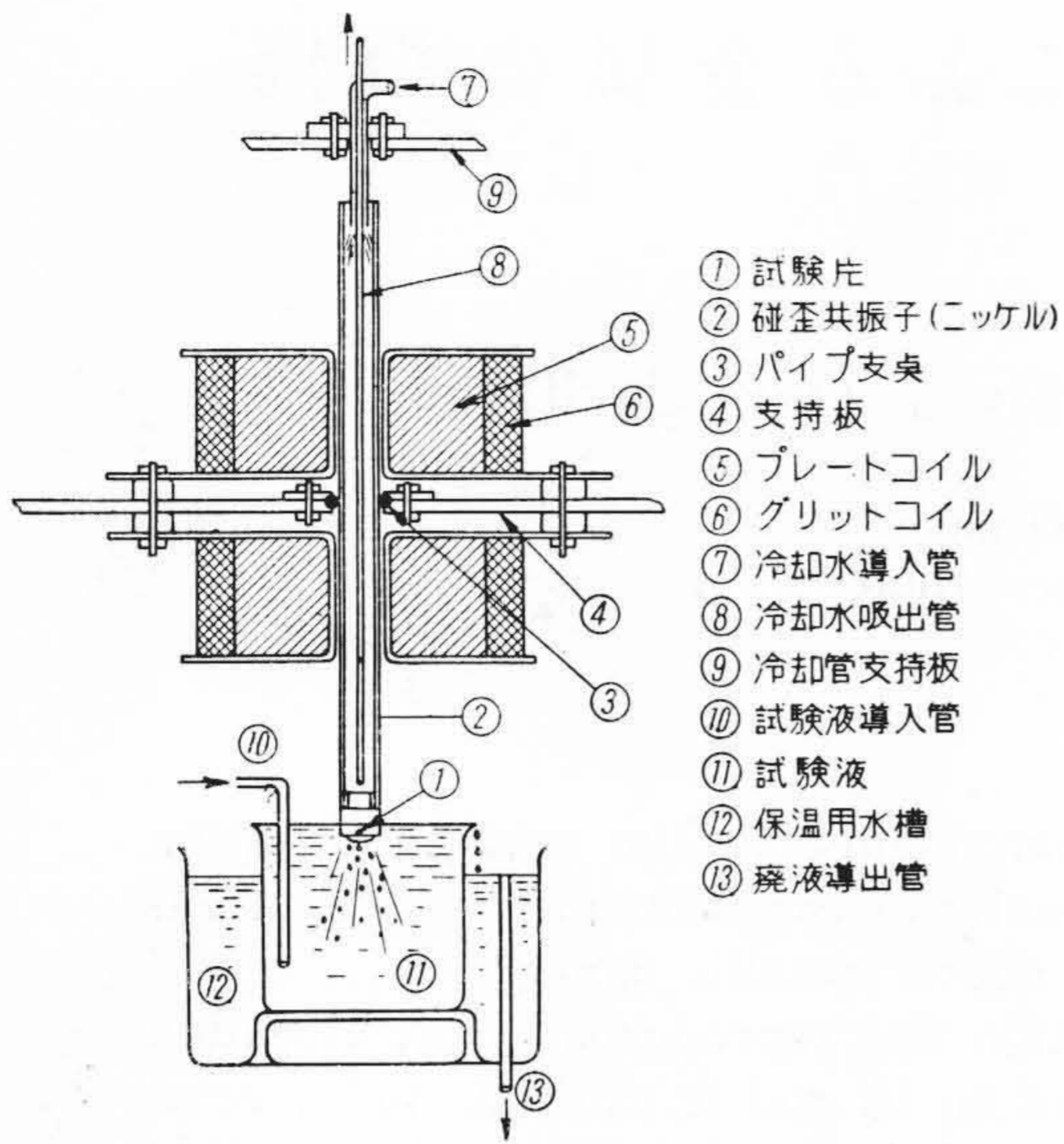
#### （2）設備および試験条件の概要

第1図は研究ならびに確性試験用として現用の試験装

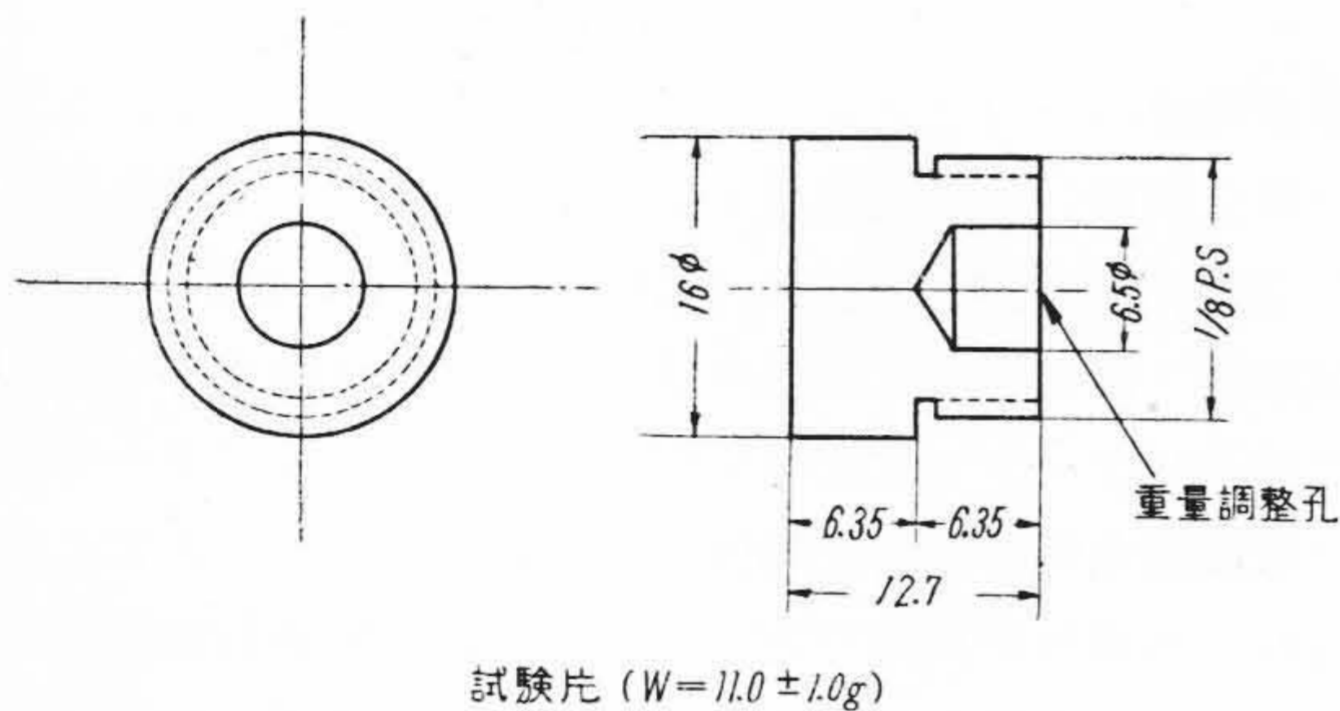


第1図 試験装置  
Fig.1. General View of Testing Apparatus

\* 日立製作所日立研究所



第2図 試験装置要図  
Fig.2. Schematic Diagram of the Apparatus



試験片 (W=11.0±1.0g)

第3図 試験片要図  
Fig.3. Dimensions of Cavitation Erosion Test Specimen

置要部の外観を示す。

(A) 試験装置

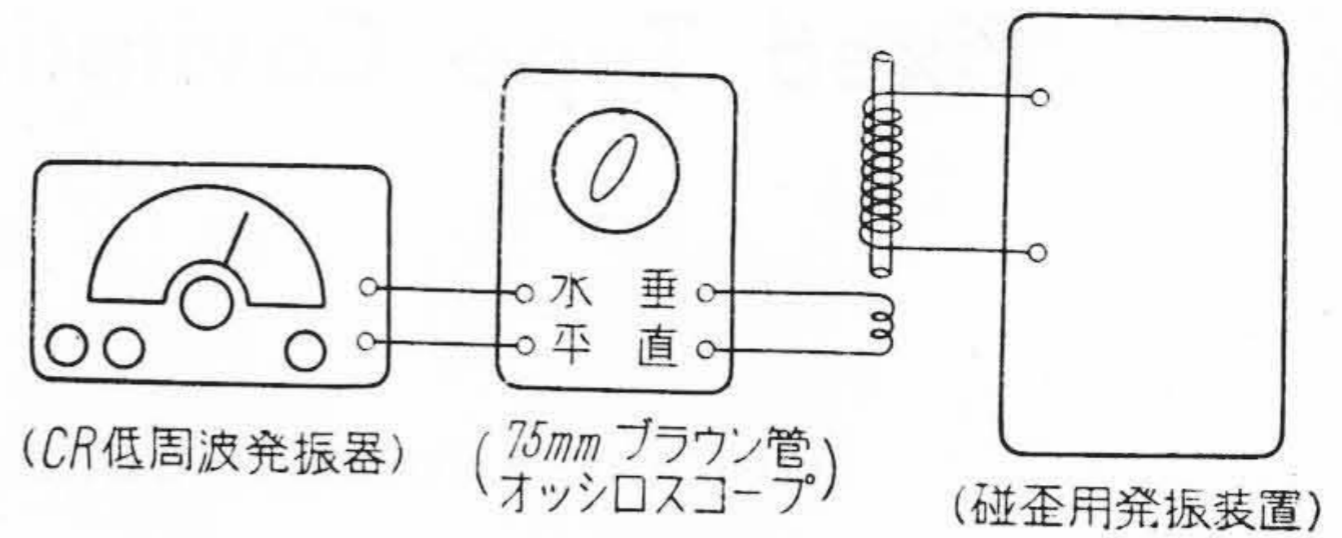
第2図は試験装置要部の構造を、第3図は試験片を示す。一般にジュール効果を弾性波の勢力源として利用する場合は、歪を静磁歪の程度に止めて共振を利用せず、周波数の高い領域<sup>(17)</sup>で多く用いられるが、本試験法では、条件を苛酷にして短時間で試験を終らせたいという実験上の要求から、両端自由な棒状磁歪共振子の構造を用いている。

これに直流ならびに交番磁化を与える発振回路は、従来<sup>(12)</sup>のものと同様である。

(B) 補助装置および試験条件

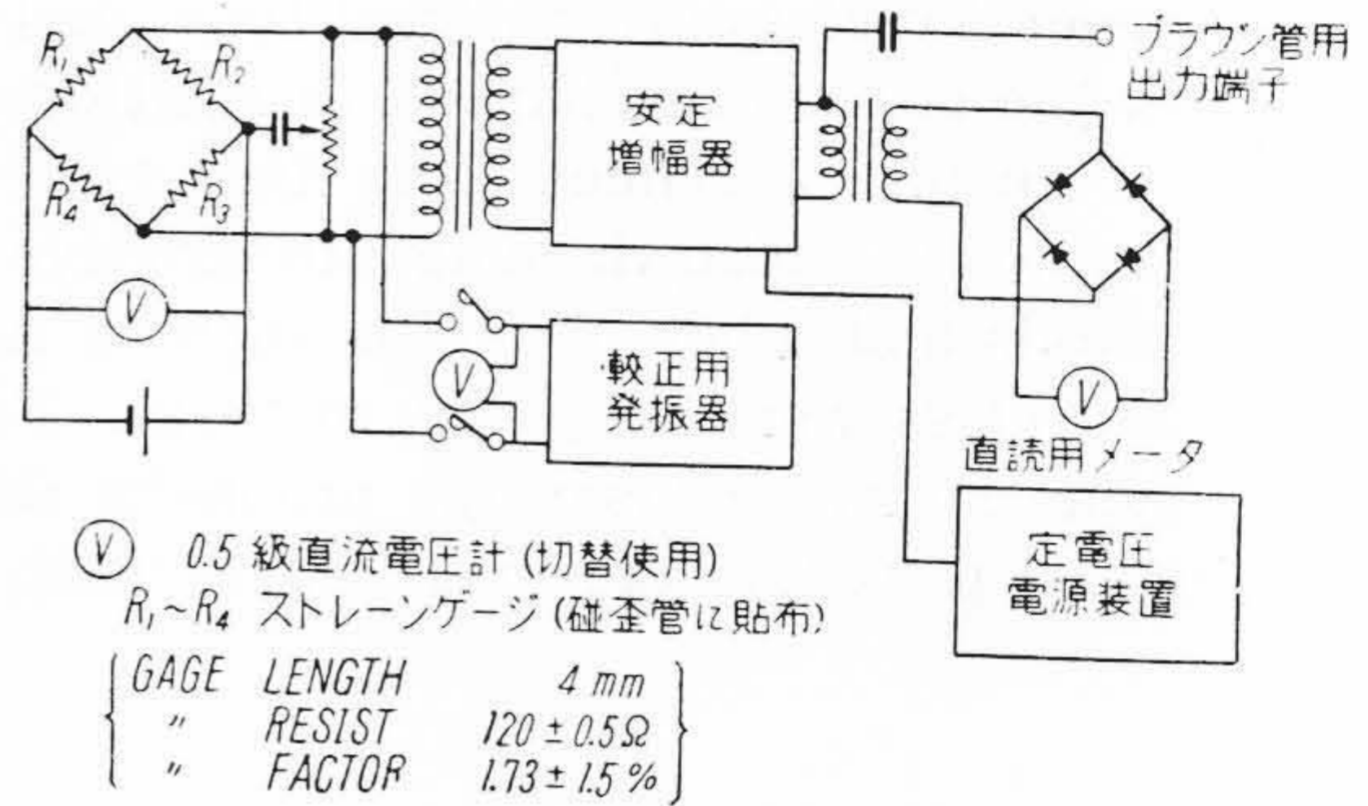
(a) 発振周波数の監視と調整

磁歪共振子の共振状態を利用する本試験法では、発振周波数の監視、調整は特に重要である。第4図はその監



第4図 発振周波数監視装置要図  
(リサーチ法)

Fig.4. Schematic Diagram of Variation Detector for Frequency in Resonance



V 0.5級直流電圧計(切替使用)  
R<sub>1</sub>~R<sub>4</sub> ストレインゲージ(磁歪管に貼布)  

GAGE LENGTH	4 mm
" RESIST	120 ± 0.5Ω
" FACTOR	1.73 ± 1.5%

第5図 振幅(磁歪)監視装置要図  
Fig.5. Schematic Diagram of Variation Detector for Amplitude (Magnetostriction)

視法の説明図である。すなわち、ブラウン管オシロスコープを利用したリサーチ法で、振動子の固有振動を低周波発振器で代表させ、そのズレは磁歪用発振器の可変蓄電器によって調整する。周波数は6,200~で、精度はきわめて高い。

(b) 振幅の監視と調整

第5図は振幅(磁歪)監視法の説明図である。発振周波数と同程度に重要であるが、その精度は直読メータの精度およびストレインゲージの公差によって制約される。装置は特別設計によるダイナミック・ストレインメータで磁歪の相対的な変化を監視している。調整は発振器の回路条件によって行う。

(c) 試験液

試験液による影響を一応分離して考えるため、特別の場合を除き試験液はイオン交換樹脂による精製水を用いる。水温 25±0.2°C、比伝導度 5 μΩ/cm 以下、給水速度約 2.3 l/h である。

(d) その他

電源電圧の変動および商用周波数変動の影響を除くため、特別設計による自動電圧調整器が用いられており、

その変動は起動、停止の 2~3 秒を除き ±0.5% 以下である。全試験時間は 120 分、潰蝕による重量変化は 30 分毎に自動天秤で秤量する。秤量精度は 0.25 mg であり、潰蝕状況の記録は通常拡大写真による。

〔III〕 本試験法による二三の実験

各種金属材料の耐潰蝕性について、磁歪振動法による試験結果はすでに多く発表(8), (12)~(15) されているので、ここではフィックスド・タイプ・キャビテーションによる試験例の一二を示すに止め、最近特に関心をもたれているその損傷機構考察のための実験についても述べる。

(1) 金属材料についての試験例

金属材料についての試験は、いずれもさきに述べた条件によるものである。

(A) アルミブロンズ

(a) 試料

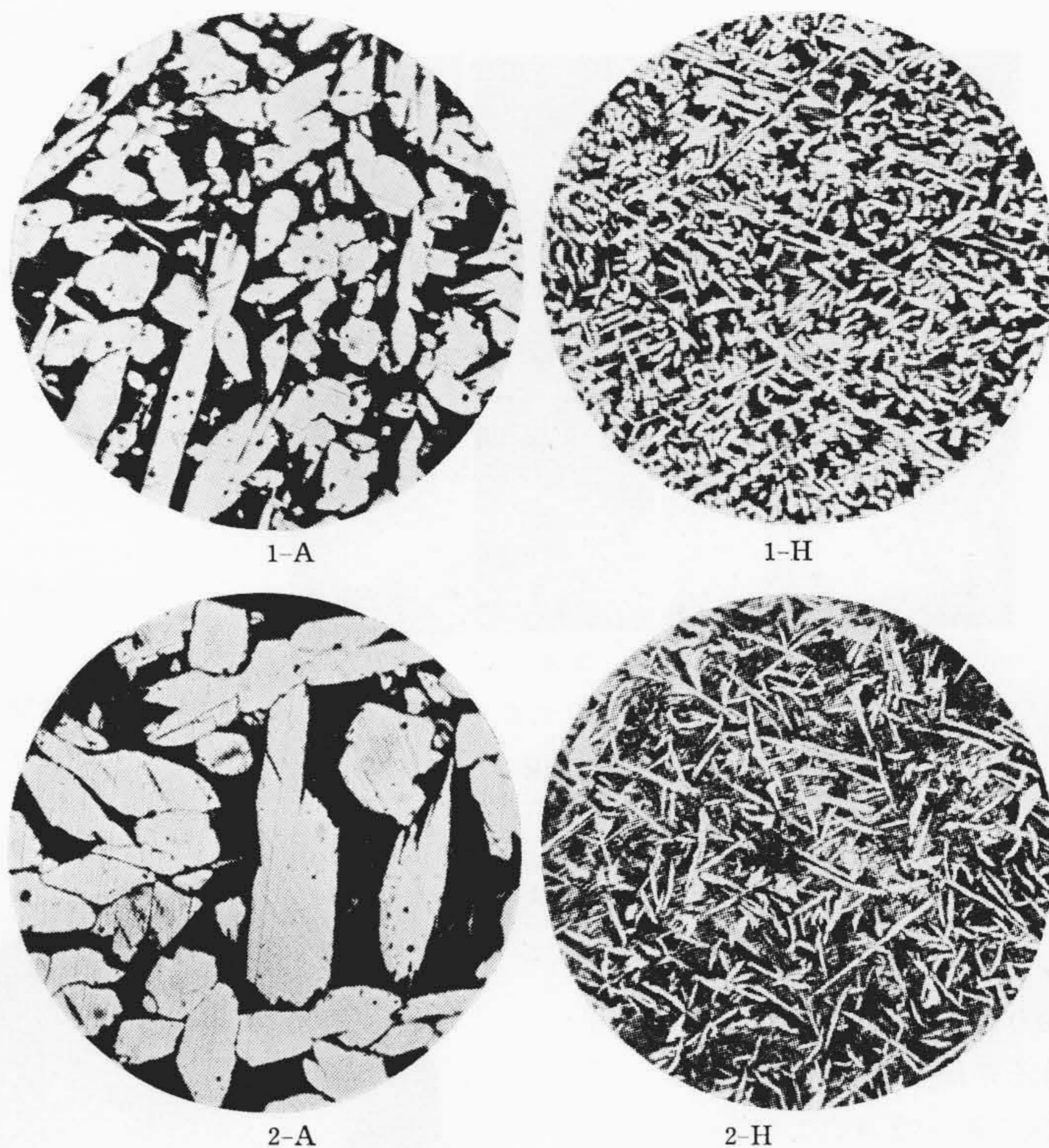
第 1 表は、供試料の化学組成および機械的性質を、第 6 図は顕微鏡組織、第 7 図(次頁参照)はマクロ組織を示す。

(b) 試験結果

第 8 図(次頁参照)は潰蝕による減量と試験時間との関係を、第 9 図(次頁参照)は潰蝕面の状況を示す。

(c) 結果の検討

まず特長的な点は、第 9 図の潰蝕面が第 7 図に示され



第 6 図 アルミブロンズ試料の顕微鏡組織 (×100)

Fig. 6. Microstructures of Al-Bronze (×100)

るマクロ組織とよく似た外観を呈することである。これを詳細に調べると結晶面によつて潰蝕の程度を異にすることが知られるが、これは結晶面により原子の配列密度が異なるためと考えられる。

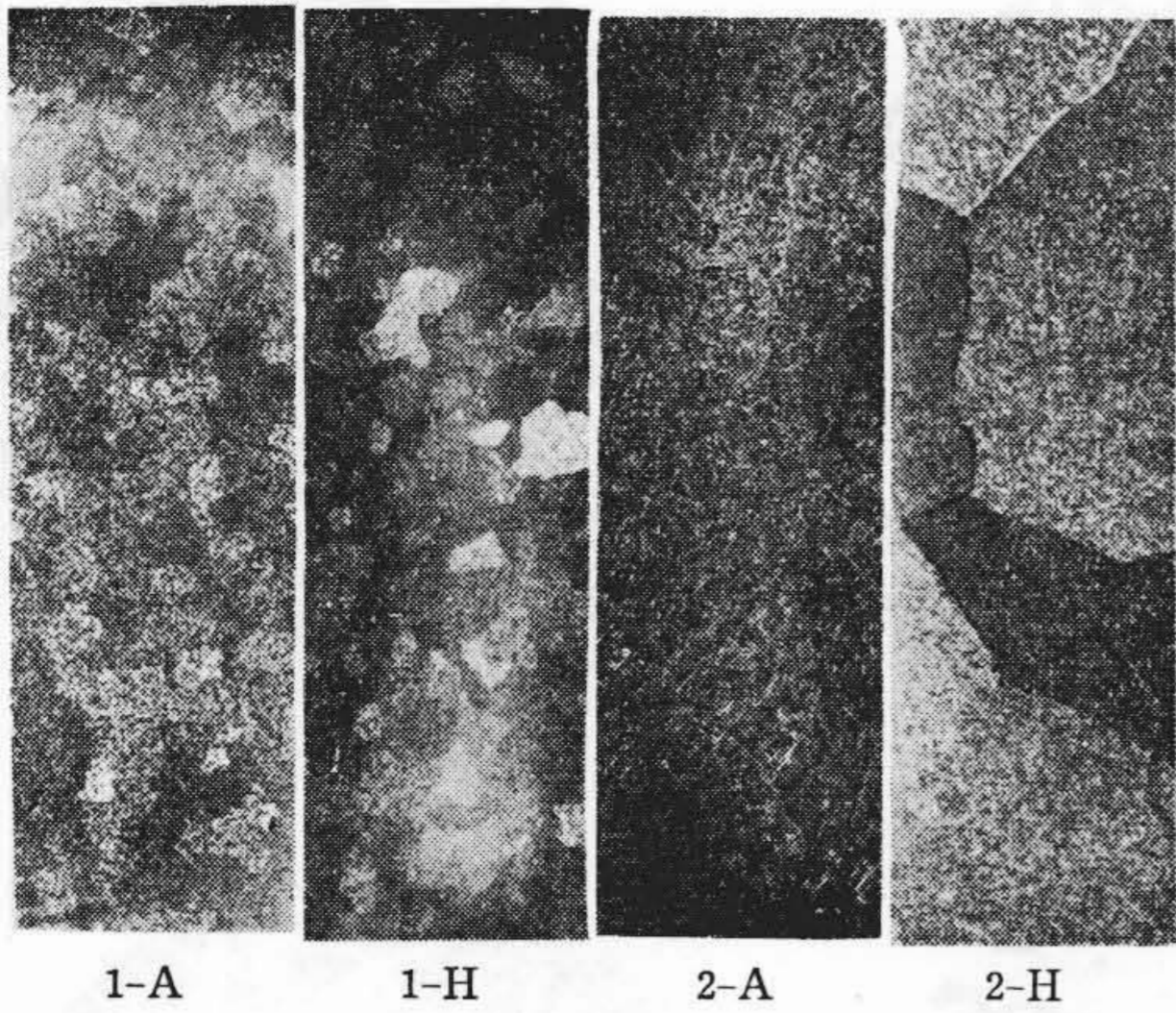
また硬さと潰蝕量を比較すると、鋳造のままでは No. 2の方がやや硬く、熱処理したものでは逆に No. 2の方が軟かいにもかかわらず潰蝕量はいずれも No. 2の

第 1 表 アルミブロンズ供試料の化学組成と機械的性質  
Table 1. Chemical Composition and Mechanical Property of Al-Bronze Specimens

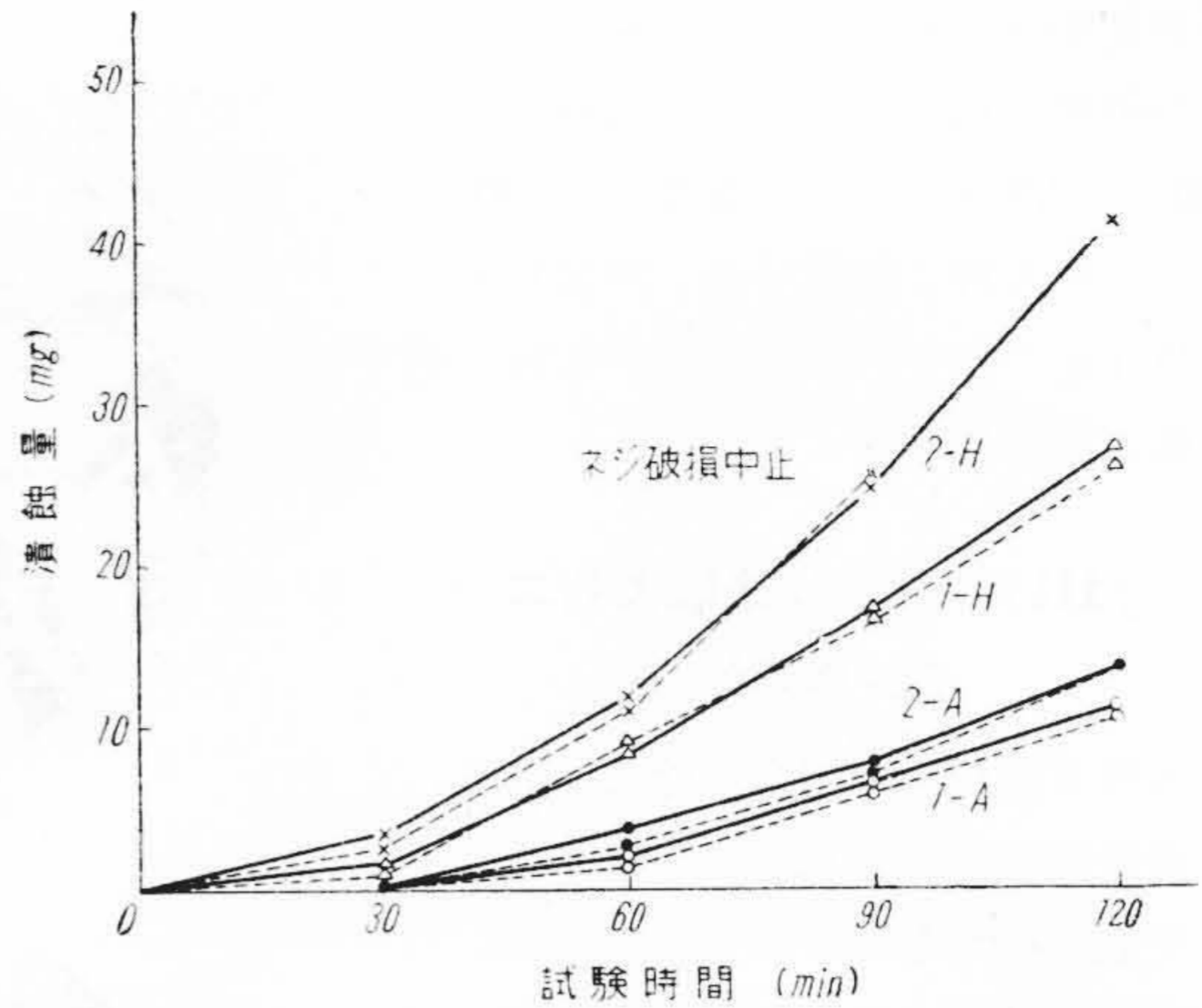
試料記号	分 析 組 成 (%)						熱 処 理	機 械 的 性 質		
	Cu	Al	Fe	Ni	Sn	P		引張り強さ (kg/mm <sup>2</sup> )	伸 び (%)	硬 さ** (シヨアー)
1-A	86.21	10.15	0.56	1.88	0.30	0.07	鋳造のまま	61.6	14.4	29.1
								63.6	19.6	28.2
1-H	86.21	10.15	0.56	1.88	0.30	0.07	熱 処 理*	84.3	2.1	52.5
								79.0	1.4	55.5
2-A	84.14	10.30	0.15	2.36	0.21	0.03	鋳造のまま	56.0	12.0	25.1
								56.5	12.8	25.6
2-H	84.14	10.30	0.15	2.36	0.21	0.03	熱 処 理*	72.5	0.8	61.5
								70.8	1.3	61.6

(注) \*熱処理条件: 850°C×1h → 水冷 → 350°C×2h 炉冷

\*\* 試験面の周辺部の 4 点について測定した平均値を示す。



第7図 アルミブロンズ試料のマクロ組織 (×5)  
Fig.7. Macroscopic Etching Figures of Al-Bronze (×5)



第8図 アルミブロンズの試験結果  
Fig.8. Weight Loss-Time Results of Al-Bronze by Fixed Type Cavitation

方が多い。従来一般には“硬い方がキャビテーションに強い”と考えられており、また発表された多くの結果も大体その傾向を示しているようであるが、これが普遍的なものでないことは、同じ系統の材料についてのこの結果よりも知られる。

(B) オーステナイト系不銹鋼

(a) 試料

第2表(128頁参照)は、供試料の化学組成およびその機械的性質を示す。

(b) 試験結果

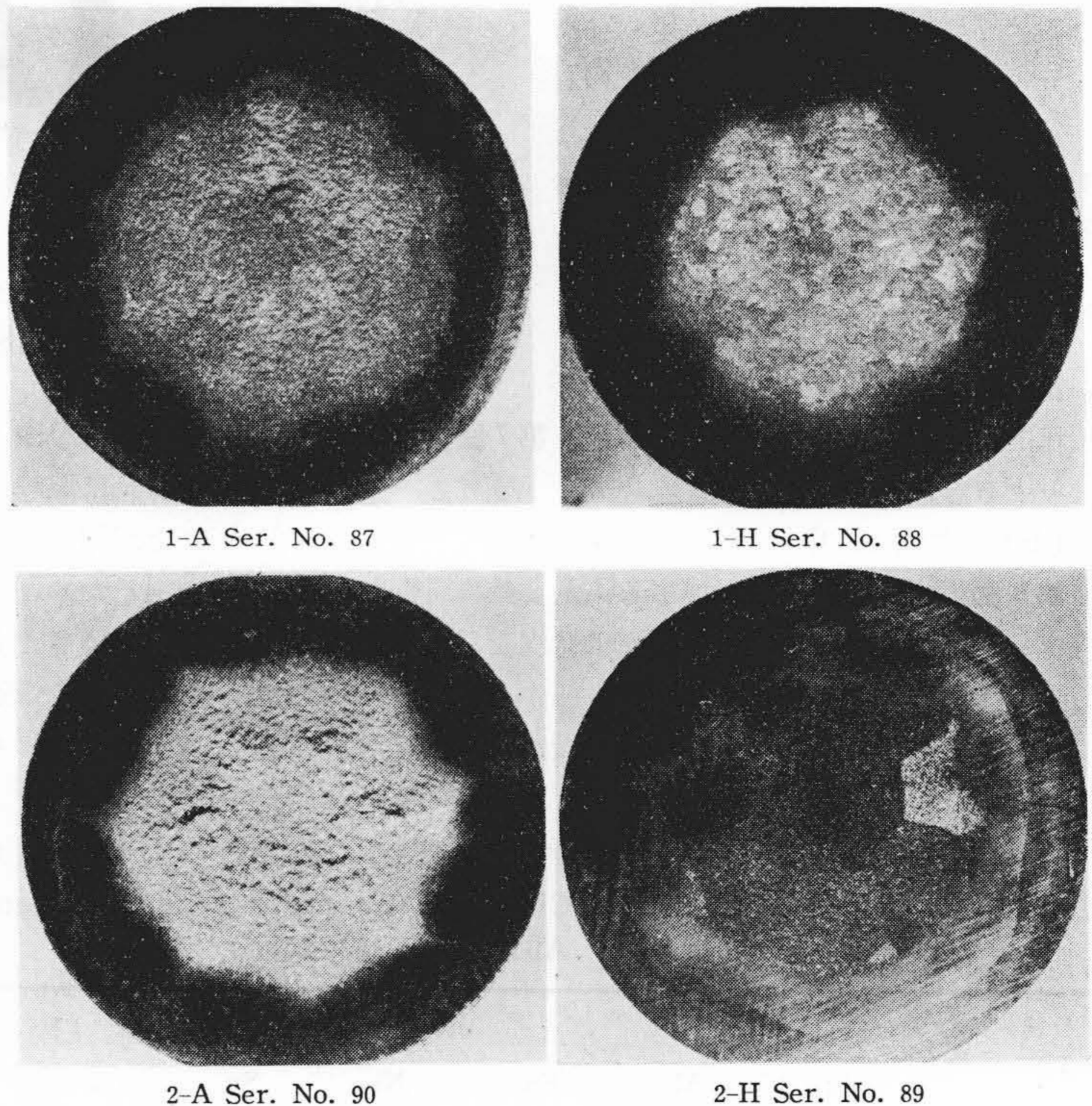
第3表(128頁参照)は、各30分の試験による潰蝕量および試験面周辺部の試験後測定した硬さを示す。また第10図はそれぞれ2箇の試験片の平均値によつて潰蝕量におよぼす成分の影響を示した。第11図はこれらのうち、Cr 18% を目標としたものの潰蝕面の外観である。

(c) 結果の検討

オーステナイト系不銹鋼では、Cr および Ni の低くオーステナイトが不安定な程、衝撃的な作用による加工硬化が起りやすいが、第2表および第3表に示したように C13 試料がやや高く、C18 試料がやや低い程度で他は著しい差異がない。しかし潰蝕を受けた部分は当然硬化が起っているものと考えられる。

(d) 鋳鋼と青銅

第12図(128頁参照)は炭素鋼鋳鋼(SC-46)と青銅



第9図 アルミブロンズの潰蝕面 (×3)  
Fig.9. Erosion Figures of Al-Bronze (×3)

(BC-1) の潰蝕状況を示す。材料は JIS 相当材であり、120 min の潰蝕量は前者が 185.3mg、後者が 263.3mg である。

(2) 損傷機構考察のための実験

(A) キャビティ崩壊過程の写真的考察

(a) 実験の方法

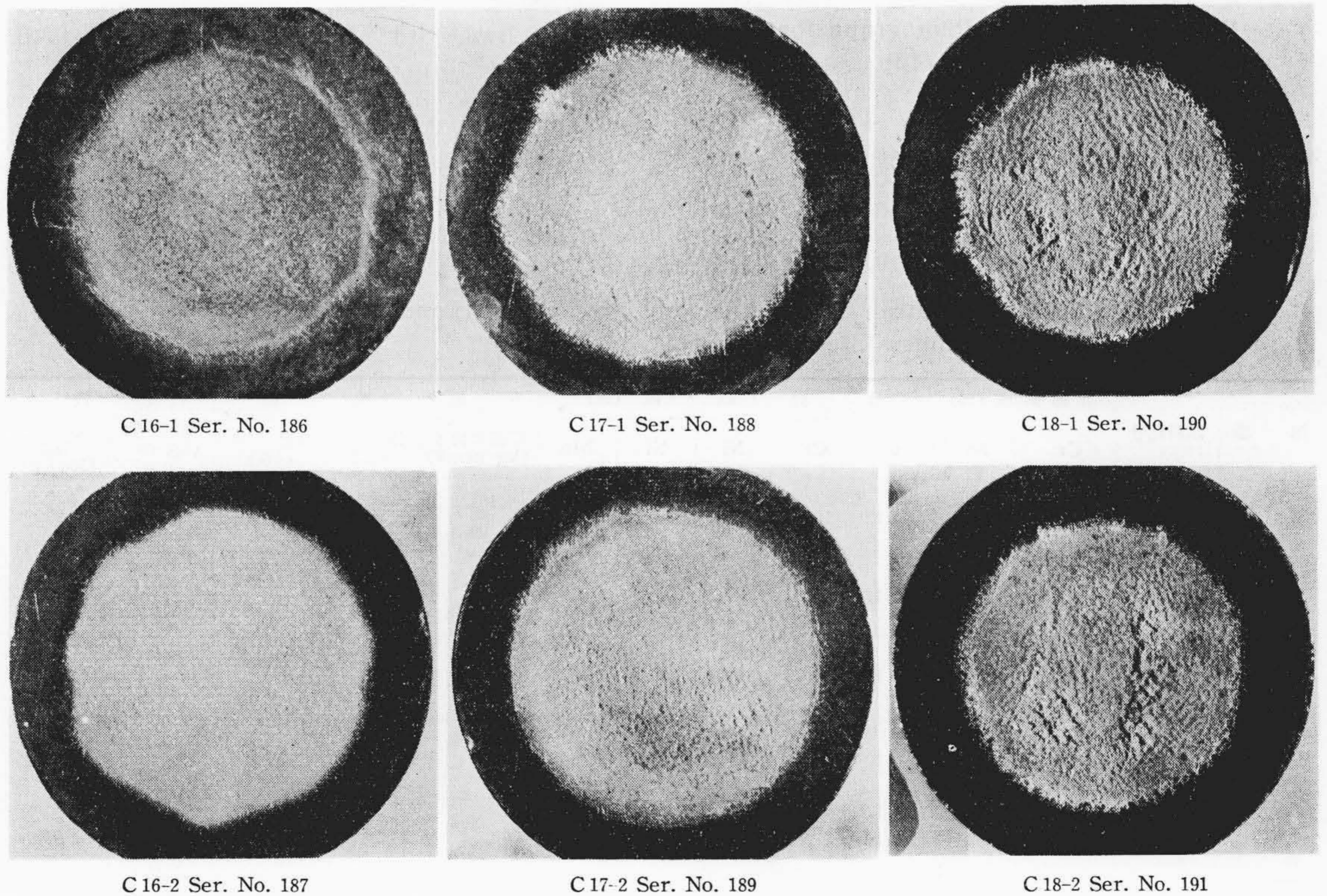
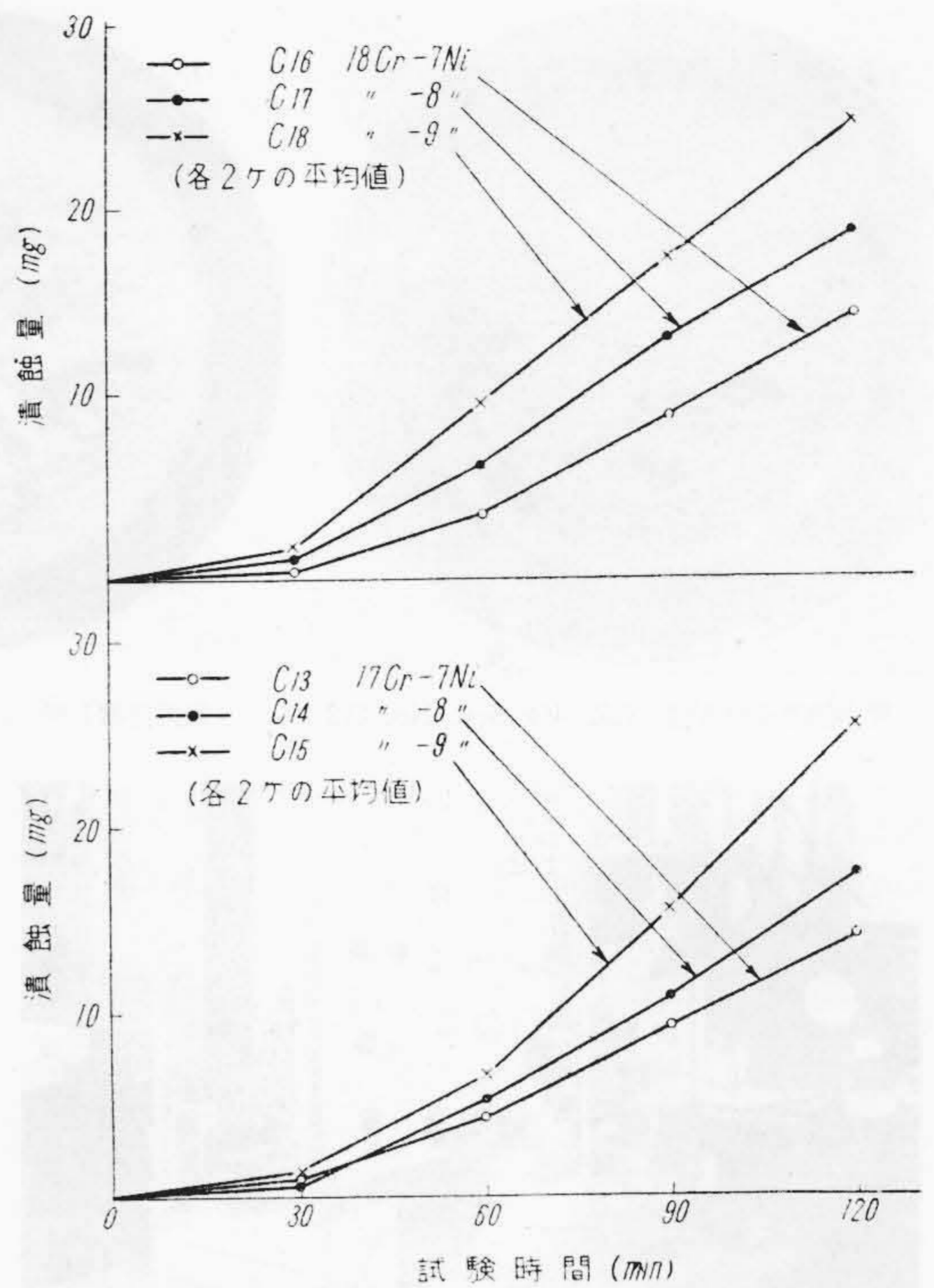
両側を平行なガラス板としたアクリル樹脂製水槽内で、本試験装置を用いてキャビテーションを発生させ、蓄電器の衝撃放電火花を光源として現象の瞬間写真を撮影した。蓄電器の容量は  $2\mu\text{F}$ 、充電電圧  $10\text{kV}$ 、電極は球電極で、その時間は  $1\sim 2\times 10^{-6}$  秒程度である。また放電の時期と試験片の上下運動(周期  $1.6\times 10^{-4}$  秒)との同期は行われていない。

写真撮影の照明法はつぎのようである。まず電極間隙より発する光をレンズで集光して、水槽内の試験片を側面より照明したのち別のレンズで収斂させて写真機のレンズに導く。写真機レンズの焦点はあらかじめ水槽内の試験片に合わせるように調整する。第13図(次頁参照)はこれらの装置を示す。この写真の左側の照明灯は、これらの光学系調整用の補助装置である。またキャビティを明るい視野の中の影として撮影したほかに、暗視野法により暗視野内の光点としても撮影した。

(b) 実験の結果

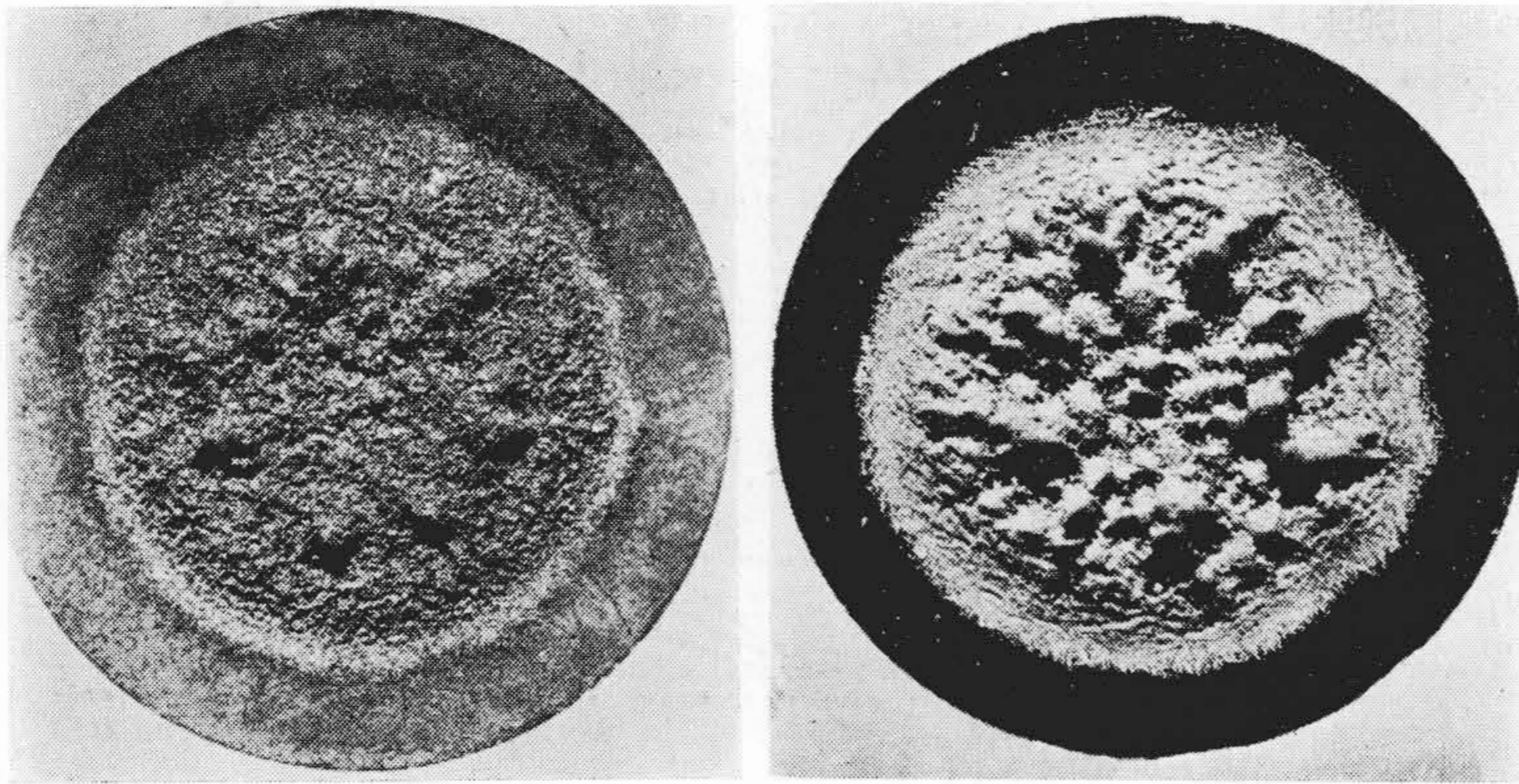
第10図 オーステナイト不銹鋼の潰蝕量におよぼす成分の影響

Fig. 10. Effect of Constituent on the Weight Loss of Austenite Stainless Steel



第11図 オーステナイト不銹鋼供試料の潰蝕面 ( $\times 3$ )

Fig. 11. Erosion Figures of Austenite Stainless Steel ( $\times 3$ )



第12図

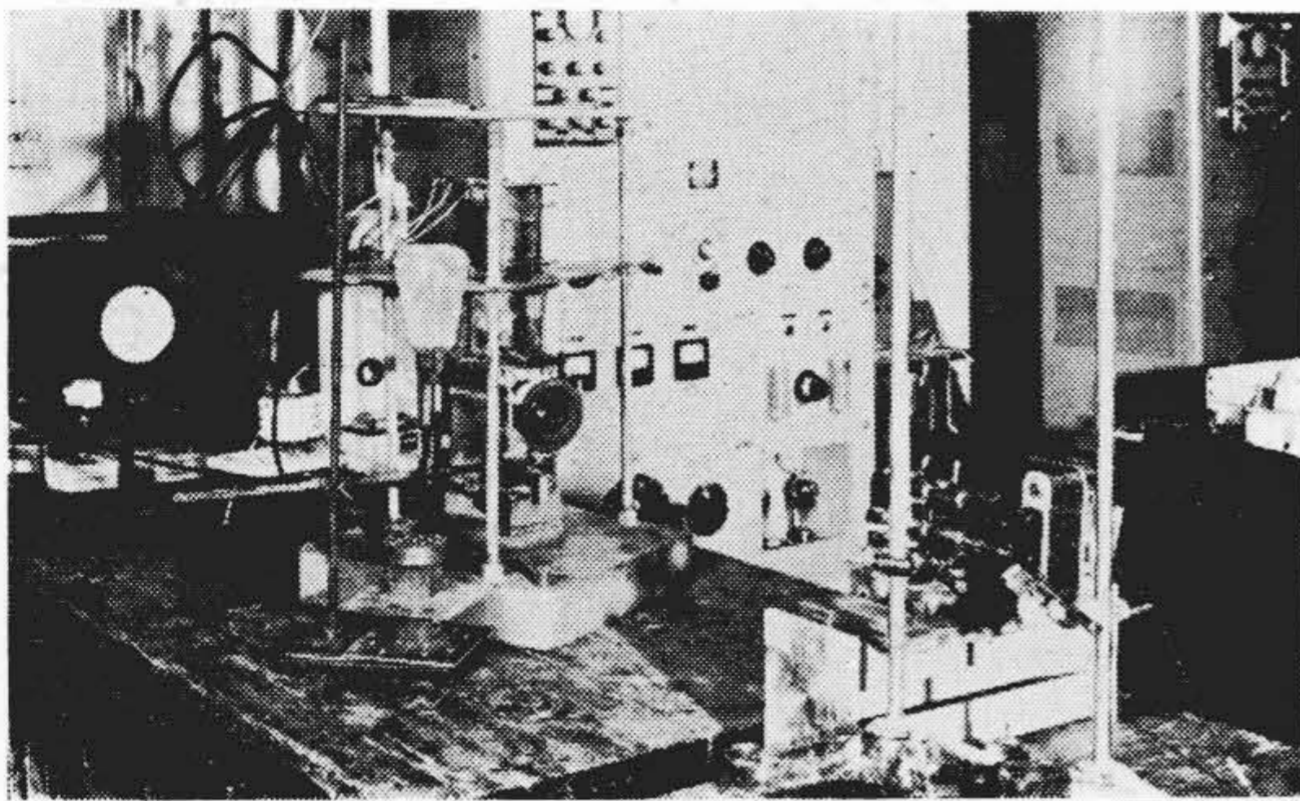
炭素鋼鑄造機と青銅鑄物の潰蝕状況 (×3)

Fig. 12.

Erosion Figures of Cast Steel and Cast Bronze (×3)

炭素鋼鑄造材3種 (SC-46) Ser. No. 212

青銅鑄物1種 (BC-1) Ser. No. 421



第13図 実験装置の説明写真

Fig. 13. Illustrating Photograph for Experimental Setup

第14図は、崩壊しているキャビティの様相を影として撮したもので、試験面の下縁との関係を表わすため引伸しに当り試験片の部分を掩い焼した。写真の下方およ

び側方にある比較的大粒の気泡は、崩壊直後のものではなく、一度飛散して生長し上昇の際に水槽ガラスの内面に附着したものである。また細長く見えるのはこれらの気泡を除くのに用いた筆の穂が抜け落ちたものである。また第15図は暗視野法によるもので、飛散する微細な気泡の流れが暗視野内の光点として示されている。

これらの写真より次のことが知られる。すなわち、

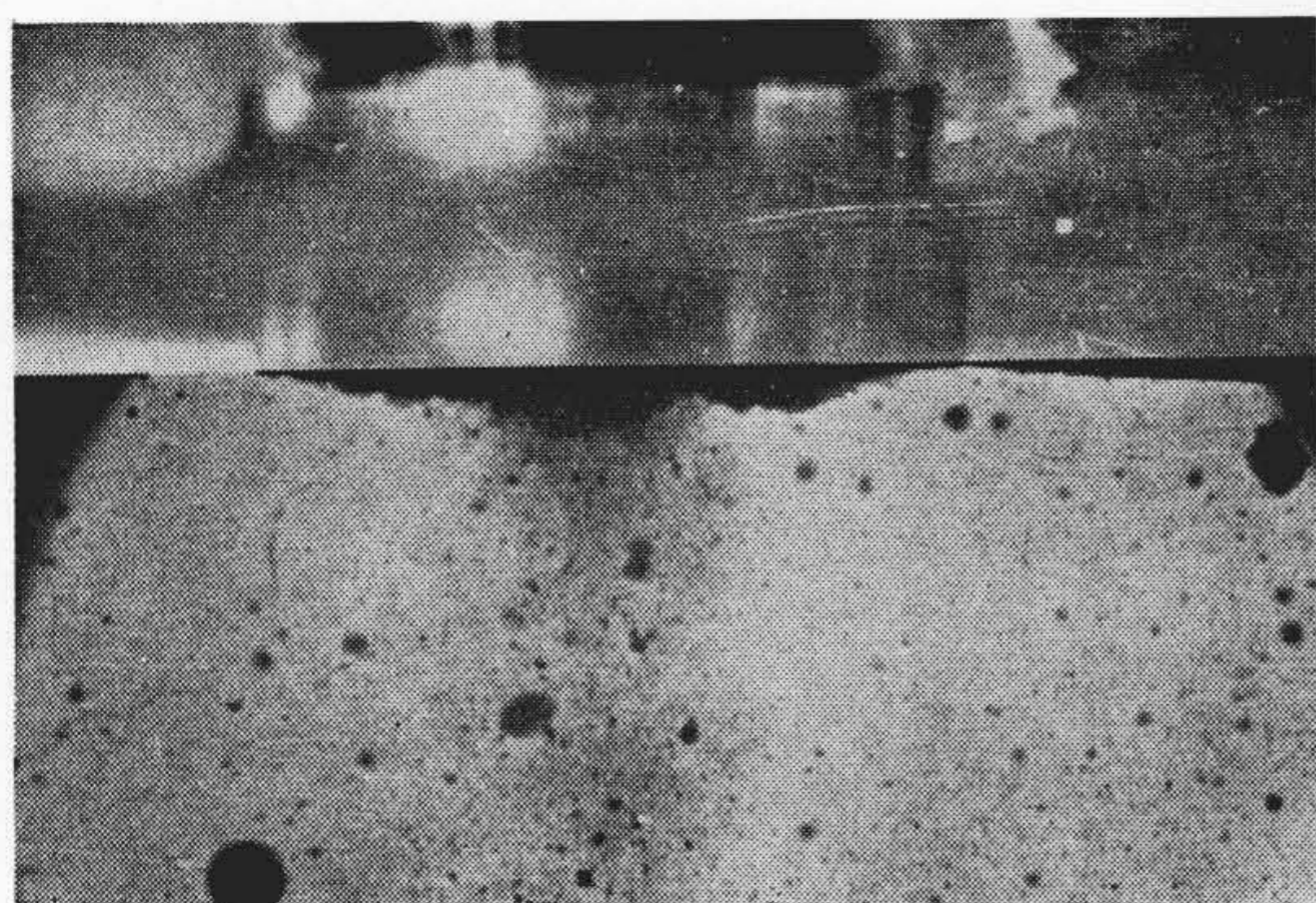
- (i) この試験法で生起しているキャビティは試験面を掩うような大型のものでクィックスドロタイプに属すること。
- (ii) 試験面の上下運動とともにキャビティの大きさ、崩壊の様相が異なること。
- (iii) 同じ写真についても中央部と外周部では変化の速さが異なること。

などである。試験片の外径が 16mm であることから気

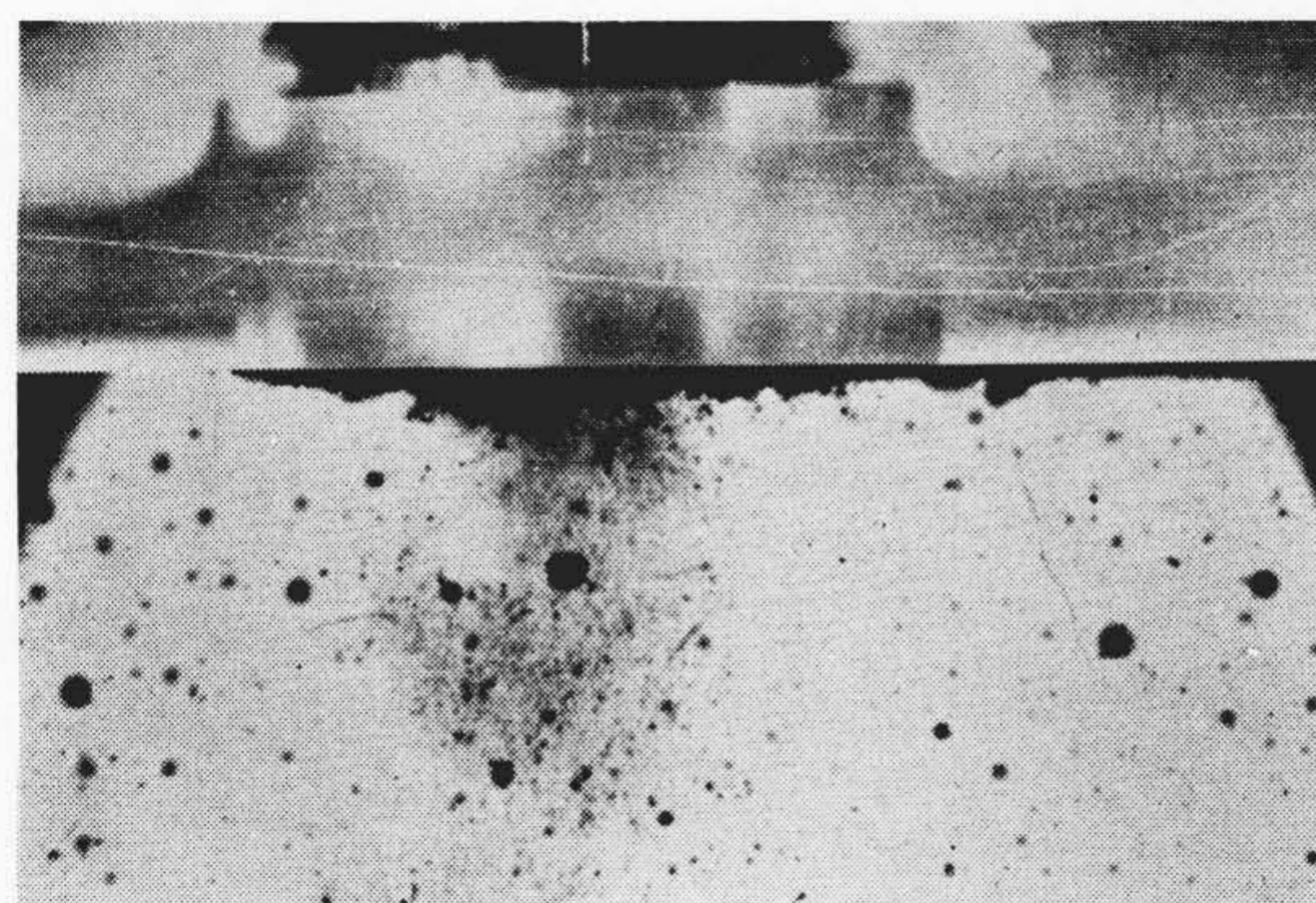
第2表 オーステナイト系不銹鋼試料の組成と機械的性質  
Table 2. Chemical Composition and Mechanical Property of Austenite Stainless Steel Specimens

熔番	試料記号	目標組成 (%)		分析組成 (%)					機械的性質				
		Cr	Ni	C	Cr	Ni	Si	Mn	引張り強さ (kg/mm <sup>2</sup> )	伸び (%)	絞り (%)	衝撃値 (kg-m/cm <sup>2</sup> )	硬さ H <sub>B</sub> (500 kg)
350	C13	17	7	0.11	16.44	7.09	0.35	0.29	101.0	20	27	16.8	99
									99.2	20	21	16.2	
352	C14	17	8	0.12	16.35	8.12	0.36	0.28	79.7	34	37	22.7	99
									76.2	37	38	20.7	
353	C15	17	9	0.12	16.59	9.08	0.24	0.30	55.8	54	52	23.0	97
									54.2	49	50	20.0	
354	C16	18	7	0.10	17.31	6.74	0.34	0.30	89.8	39	34	18.2	99
									91.7	37	35	22.9	
356	C17	18	8	0.10	17.91	8.21	0.42	0.30	71.8	43	40	21.8	96
									72.1	44	40	25.3	
357	C18	18	9	0.09	16.87	9.12	0.28	0.28	44.4	59	59	20.4	97
									48.0	58	58	23.4	

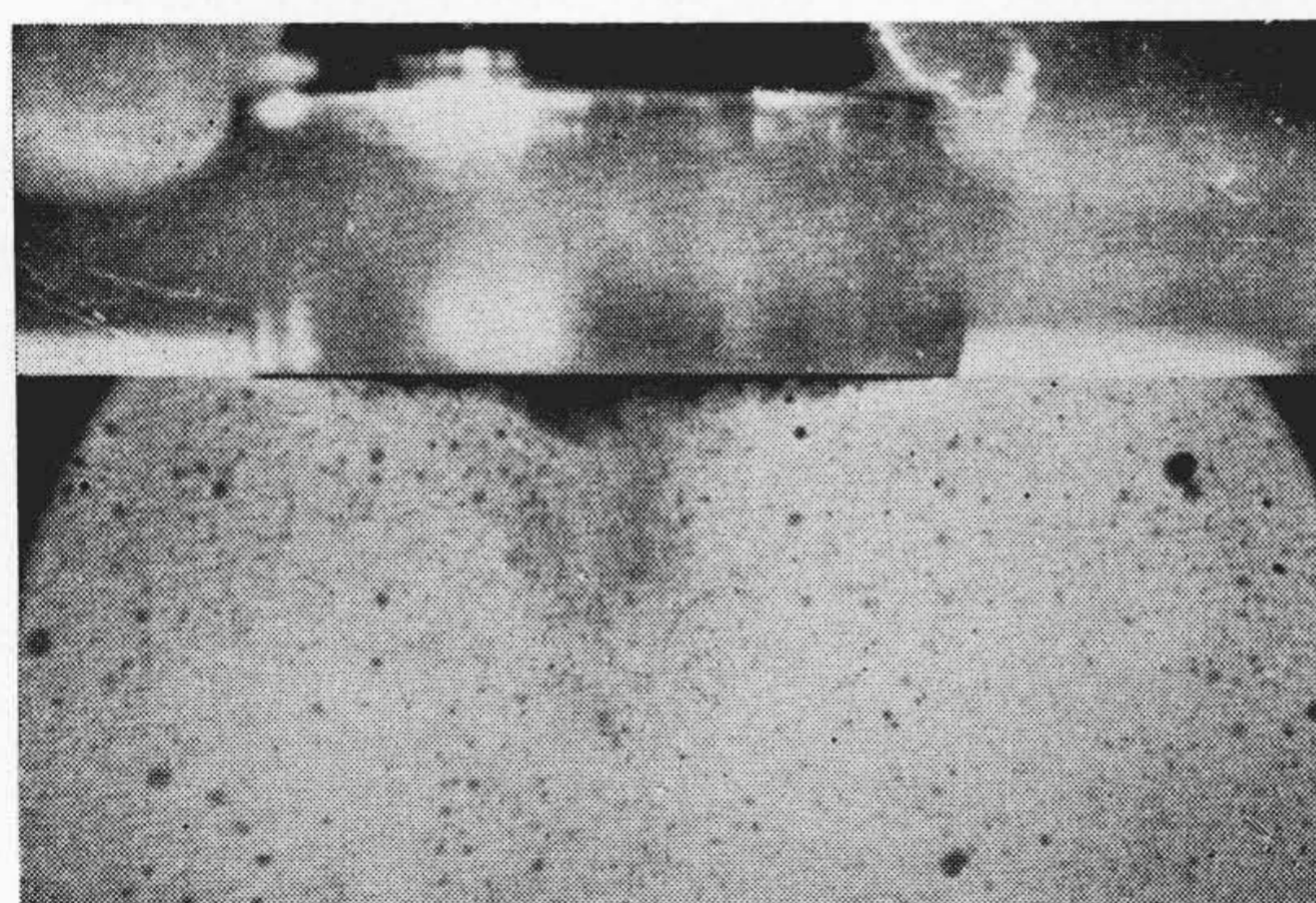
熱処理条件： 素材のまま、1,050°C×5h 保時後空冷



T.P 降下初期 (推定) 314



T.P 降下中期 (推定) 312



T.P 降下末期 (推定) 311

第14図 フィックスドタイプキャビテーションの様相 (陰影法) (×2.25)

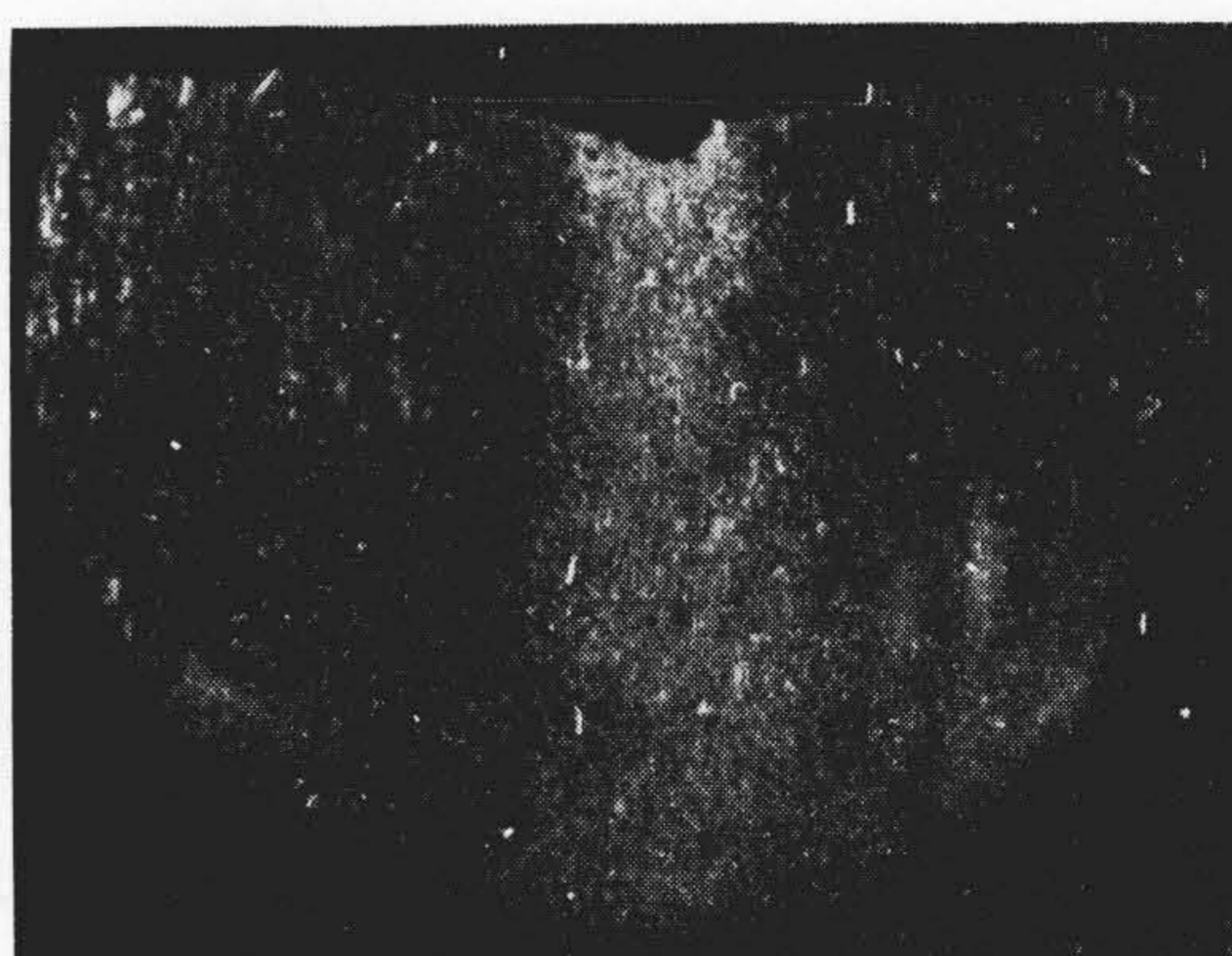
Fig. 14. Profiles of Fixed Type Cavitation (Shadow Method) (×2.25)

泡の概略の大きさが知られる。また周辺部に生成した小粒の気泡は  $1\sim 2 \times 10^{-6}$  秒程度の露出でほぼ停止した状態でその輪廓も明瞭であるが、中央部ではこの露出でも止らないのでその速さもほぼ推察できる。

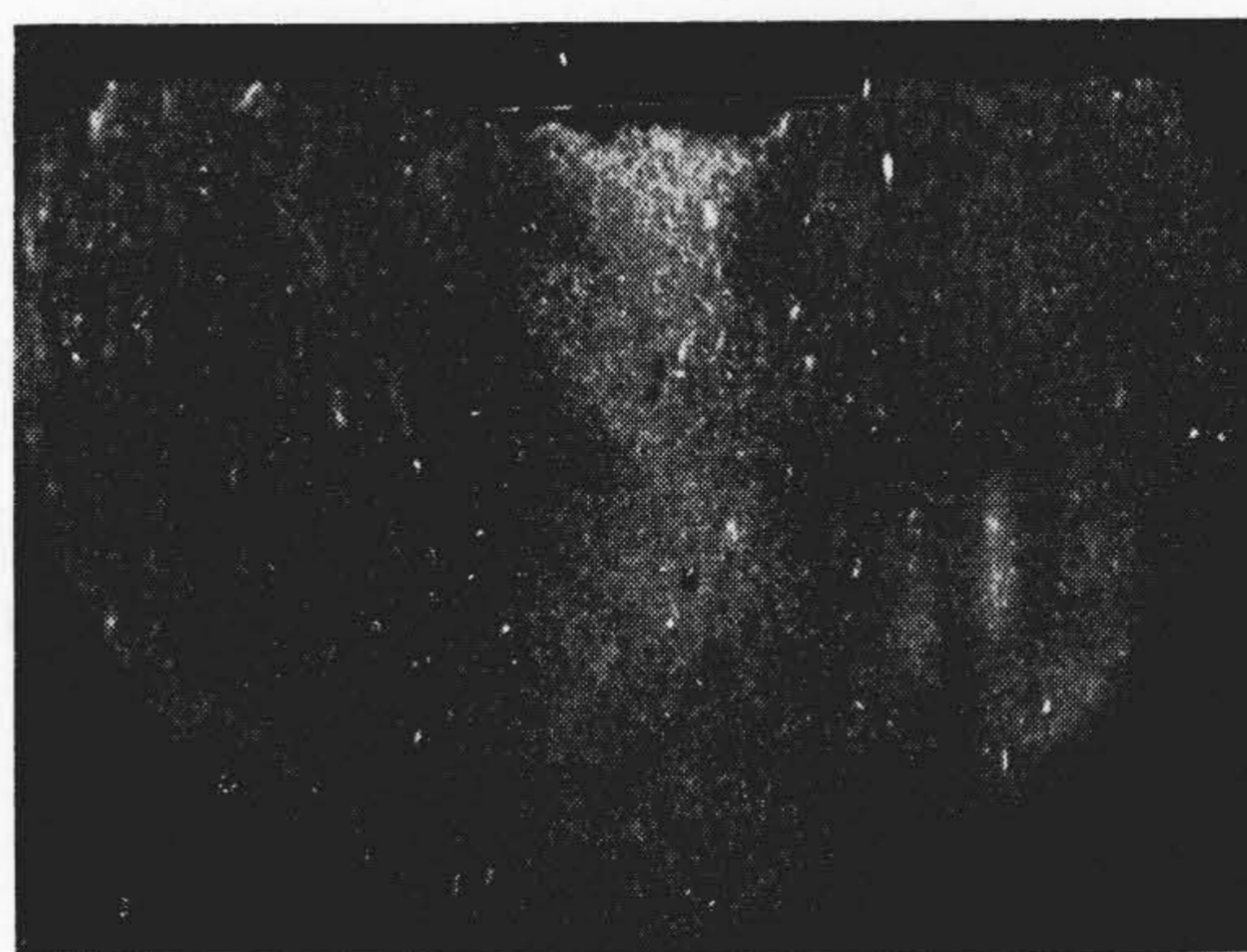
(c) キャビテーター崩壊過程の考察

(i) 崩壊の素過程についての従来の考え方

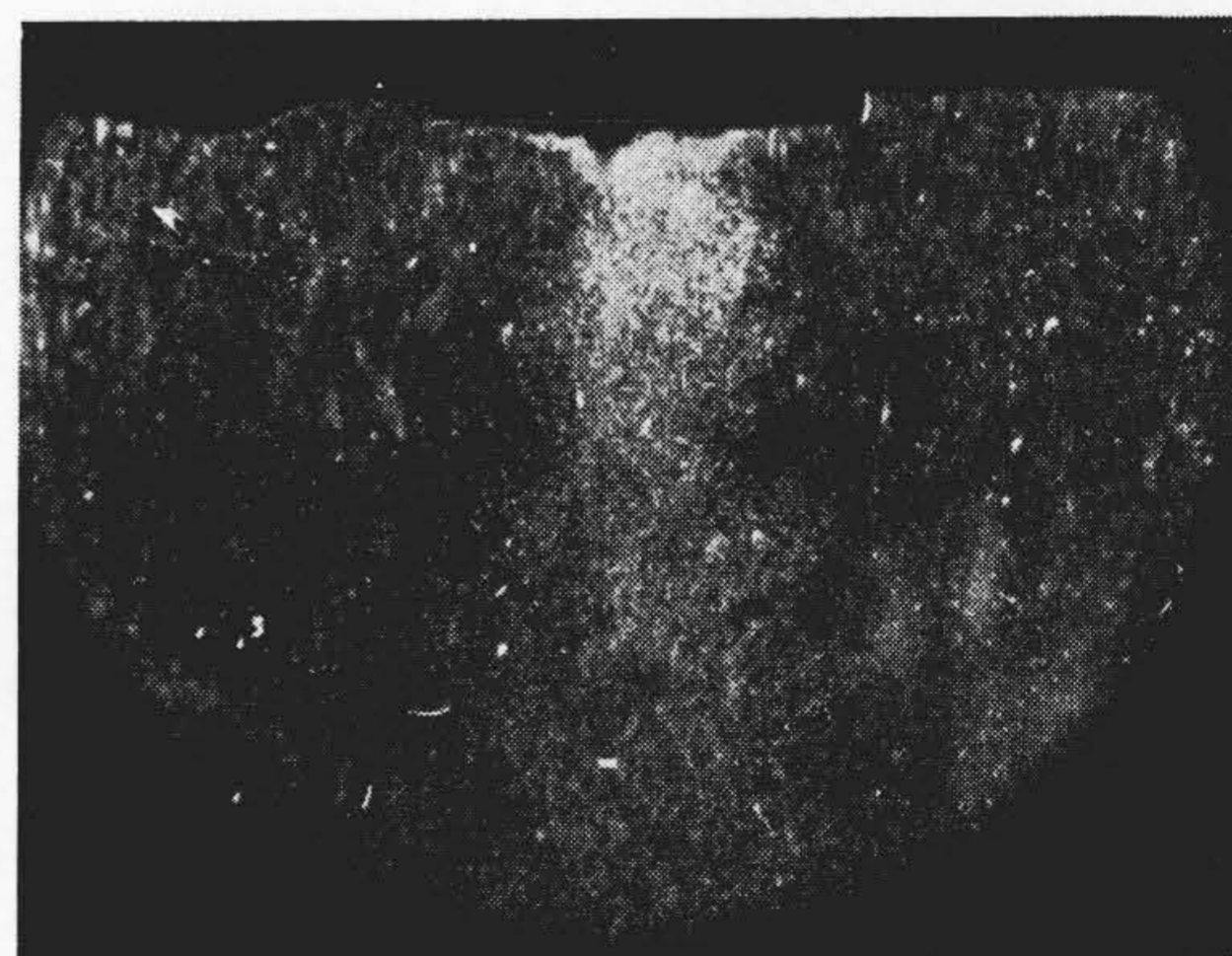
キャビテーター崩壊または消滅の素過程については、これに伴う衝撃的な作用の大きさとの関係もあり種々<sup>(18)~(20)</sup>論じられている。



降下初期 (推定) 618



降下中期 (推定) 621



降下終期 (推定) 622

第15図 フィックスドタイプキャビテーションの様相 (暗視野法) (×1.45)

Fig. 15. Profiles of Fixed Type Cavitation (Dark Field Method) (×1.45)

Rayleigh<sup>(18)</sup>, Cook<sup>(19)</sup> たちは、理想流体中の真空球を考え、これが外圧により同心球的な形を保ちながら急激に小さくなって消滅するとして、この問題を理論的に取扱っている。また Kornfeld, Suvorov<sup>(20)</sup> たちは、比較的小形のキャビテーター (Dancing Bubble と呼んでいる) の写真的、顕微鏡的観察から分割によつて崩壊する

第3表 オーステナイト系不銹鋼試料のフィックスドタイプキャビテーションによる潰蝕量  
Table 3. Weight Loss of Stainless Steel Specimens caused by Fixed Type Cavitation

目標組成 (%)		試料記号	試験番号	各30分の試験による潰蝕量 (mg)				120分試験による全潰蝕量 (mg)	試験後の硬さ* (シヨアー)
Cr	Ni			0~30	30~60	60~90	90~120		
17	7	C13-1	180	1.0	3.7	4.7	5.0	14.4	27.5
		C13-2	181	1.1	3.8	4.1	4.6	13.6	25.7
17	8	C14-1	182	1.1	4.2	6.0	6.5	17.8	23.0
		C14-2	183	0.8	4.2	5.3	6.6	16.9	24.2
17	9	C15-1	184	1.6	5.8	9.2	9.7	26.3	23.6
		C15-2	185	1.2	4.6	8.5	10.0	24.3	22.2
18	7	C16-1	186	0.2	3.5	5.0	5.3	14.0	23.6
		C16-2	187	0.9	2.6	5.1	5.7	14.3	22.1
18	8	C17-1	188	1.1	4.0	6.7	6.0	17.8	24.6
		C17-2	189	1.1	6.0	7.0	5.4	19.5	23.6
18	9	C18-1	190	1.5	7.9	7.5	7.5	24.4	21.8
		C18-2	191	1.8	7.6	8.3	7.0	24.7	20.5

(注) \*試験面の周辺部の4点について測定した平均値を示す。

ことを示した。すなわち、水蒸気を含む低い内圧の気泡を考え、水圧が急変する場合にその微小表面に働く力の不均衡から、たとえばゴム風船のように、外圧の大きい部分は内側にくびれ内圧の高い部分では外側に張り出すような形で小さい気泡が分離するというのである。そしてそのくびれを起させる水の衝撃の余勢が材料の損傷に参与するというのである。

崩壊の素過程は、筆者の写真からも後者の考え方が支持される。

#### (ii) フィックスド・タイプ・キャビテーションの崩壊

筆者の条件で形成され崩壊しているキャビテーションは、写真から知られるように、ほとんど試験片の全面をおおうような大形のものである。これは R. T. Knapp<sup>(5)</sup> の分け方によればフィックスド・タイプと呼ばれているものに属し、M. Kornfeld<sup>(20)</sup> の観察した面に平行な動きもある小形のものとはやや趣を異にしている。彼のは多分にトラベリング・タイプの性格を有している。これらは振幅の相違によるもので本質的には同じものであるが、材料の使用上特に前者がより有害とされている。

素過程について M. Kornfeld<sup>(20)</sup> の考え方を承認すれば、フィックスド・タイプ・キャビテーションの崩壊についても写真よりつぎのことが推論される。すなわち、細粒化の時間的経過が非常に速いことから、分割によつて生成した細粒はフィックスド・タイプ・キャビテーションの表面張力の拘束より脱し、相当大きな初速で飛び出すとともに、残った方の気液界面の各微小部分はこれに伴う内外圧力分布の衝撃的な急変によつて周期の短い振動を生ずるであろう。この微小表面の振動は連鎖的にフィックスド・タイプ・キャビテーション表層部の細粒化に寄与し、あ

るいはまた水にエネルギーを与えて試験面を衝撃させ、別にそのエネルギーの一部は弾性波として水中を伝播<sup>(21)(22)</sup>することにより失われるであろう。

第14図の写真についてさきに述べたごとく、この微小界面の振動の周期や振幅は試験面の中央部と外縁部では異なり、また試験面の運動とともに時間的にも変化しているものと考えられる。したがつて潰蝕に直接的な関連を有するのはこの微小界面の複雑な振動であり、磁歪共振子の振動 (6,200 cps) とは無関係ではないが、一応区別して考えられるべきである。

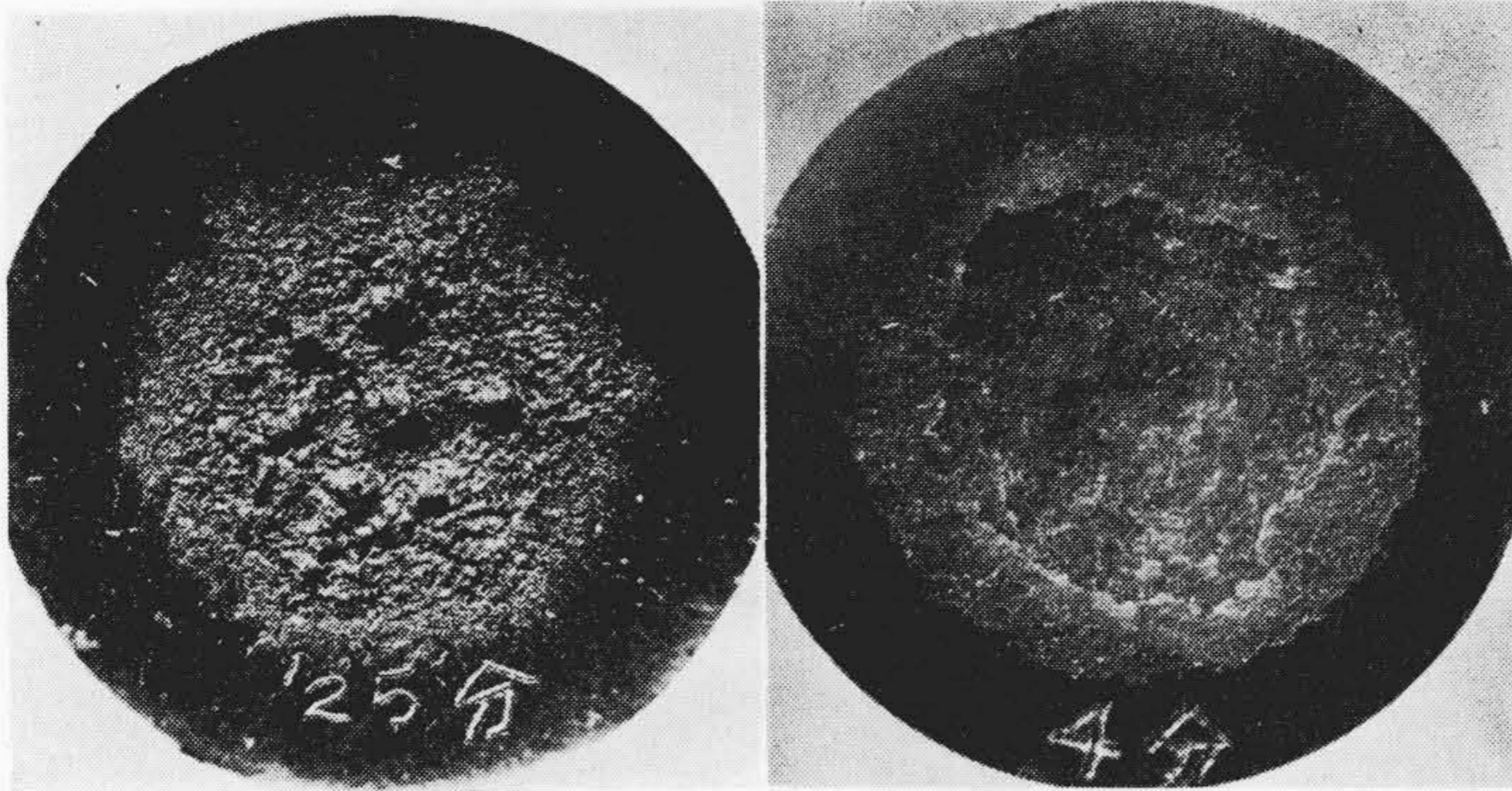
つぎに大形キャビテーションは、その気液界面に近いきわめて薄い層から逐次細粒化されて飛散することが認められるが、これは素過程の分布が密で変化が速いことことからたやすく理解される。

また振動のエネルギーがつぎの細粒化に消費されるということは、別の見方からすれば大形キャビテーションによつて水の衝撃的な作用が緩衝されるということである。

この緩衝作用 (Air Cushioning) は、写真よりの以上の考察から理論的にも期待されるが、また S. L. Keer<sup>(13)</sup> の示した実験事実\*も、これを支持するものと考えられる。

(\* ) S. L. Keerの実験： 試験用水の水温が潰蝕量におよぼす影響について磁歪振動法により実験し、次に要約する結果を示している。すなわち、キャビテーションは水温の上昇とともに烈しくなるが、これによる潰蝕量は、試験用水が清水の場合 50°C 附近で極大値をとり、沸騰状態に近づくにしたがつてほとんど侵されなくなるというのである。筆者も本試験法について行つた予備実験でほぼ同様な事実を認めた。

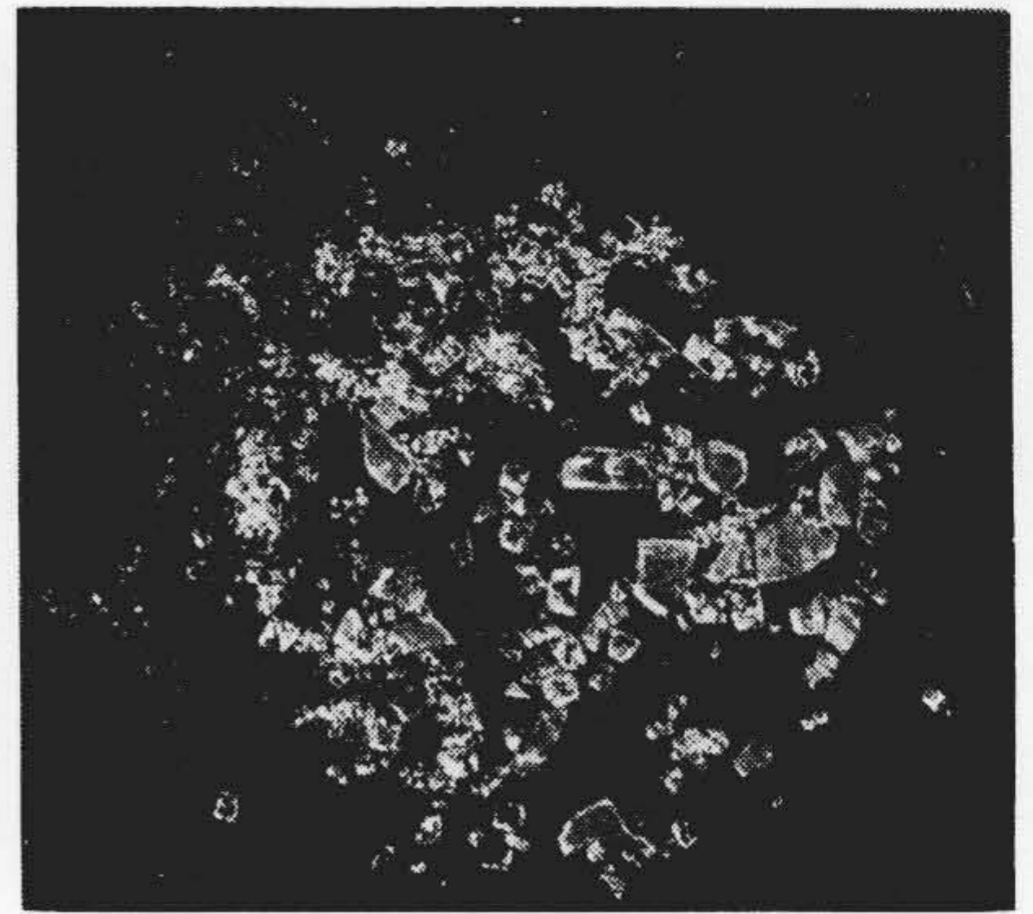




ベークライト棒 (黒色)                      ベークライト積層板 (薄茶色)

第16図 ベークライト試片に対するフィクストタイプキャビテーションの破壊的な作用 (×3)

Fig. 16. The Destructive Action of Fixed Type Cavitation on Bakelite Specimens (×3)



第17図 板ガラス試片に対するフィクストタイプキャビテーションの破壊的な作用 (×1)

Fig. 17. The Destructive Action of Fixed Type Cavitation on a Glass Plate (×1)

(B) ベークライトおよびガラスの試験

(a) 試料

市販のフェノール樹脂成型材と積層板(ベークライト)より直径 16mm, 厚さ 5mm の小円板形試験片を作製し, またガラスは約 1mm 厚の写真乾板用板ガラスより直径約 16mm の小円板をグラインダーで仕上げたのち, セメンダインで鍛鋼製試験片の試験面に貼付して試料とした。

(b) 試験結果

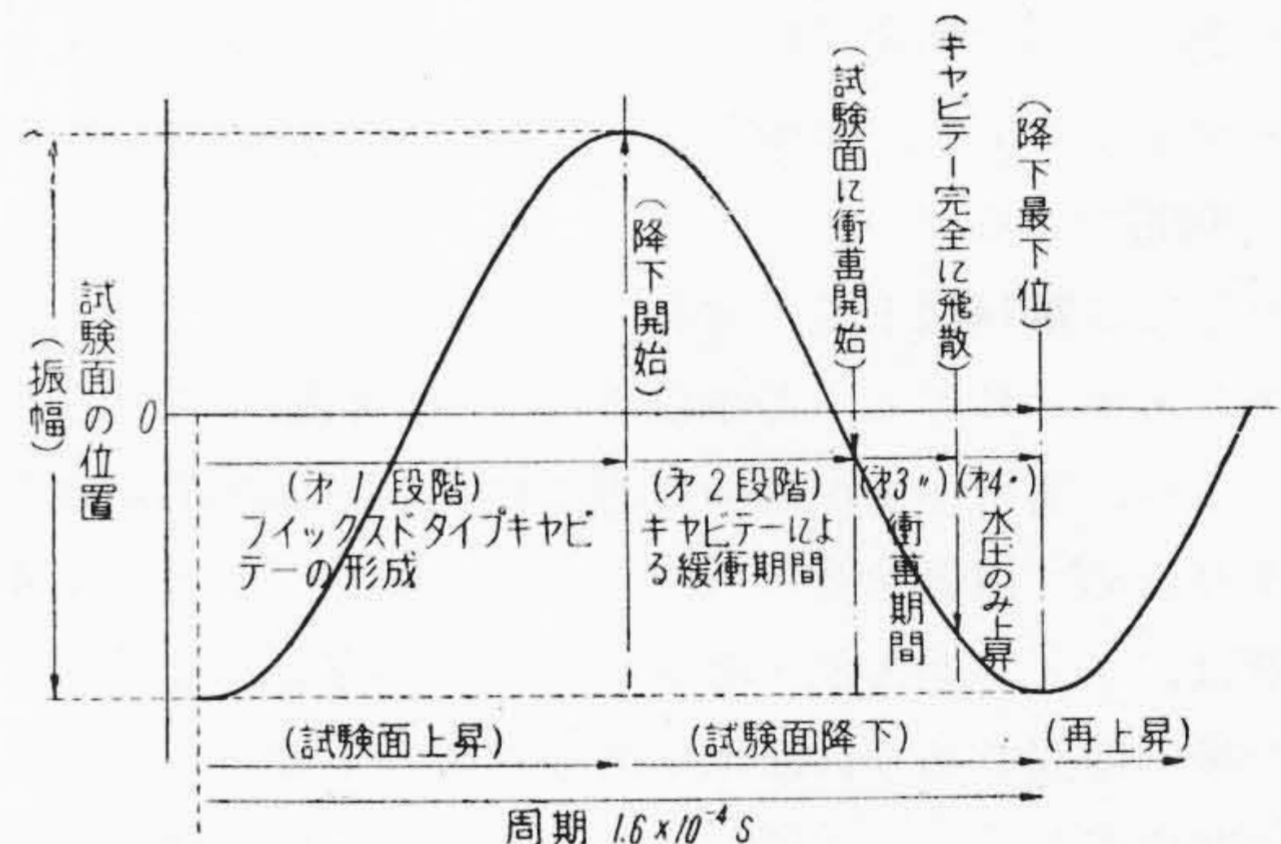
第16図はフェノール樹脂成型材と積層材との潰蝕状況を示す。前者は約 25 分, 後者は約 4 分で剥離したので試験を中止したものである。このベークライトの潰蝕面は成型材と積層板との特性的な差異をよく示している。また第17図はガラス板試料の破片である。ガラス板試料は 3 箇試験したがいずれも 20 秒前後でこのように破碎した。

〔IV〕 損傷機構とこれに関連した一般的考察

(1) キャビテーションに伴う損傷作用の本質

キャビテーションに伴う損傷作用の本質については, 今なお水の物理的な衝撃による疲労破壊を主因とする説と広い意味での化学的な作用を主因とする説とが対立した形<sup>(4)</sup>をとっている。

実動流体機械材料の損耗を考える場合, キャビテーションによる本質的な作用や, 河川水質によるいわゆる腐蝕作用およびこれらの交互作用がそれぞれ重要な意味を持つことはいうまでもないが, キャビテーションによる損傷作用の本質と, 水質, 水温などの影響の問題とは, 材料の耐潰蝕性を比較評価する場合, 一応分離して考えるべき性質のものである。



第18図 フィクストタイプキャビテーションの崩壊過程説明図

Fig. 18. Illustrating Diagram of a Collapse Process of the Fixed Type Cavity

筆者は以上の観点から, 標準試験用水としてイオン交換樹脂による精製水 (水温  $25^{\circ}\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ , 比電気伝導度  $5\mu\text{S}/\text{cm}$  以下) を用いて試験を行つている。

したがって以上の意味でもなおキャビテーションに伴う損傷作用の本質が化学的なものであるとすれば, このような水質についてもかなりの損傷を起すべきものと考えられる。今かりにこのような条件下のキャビテーションによる損傷の主因が化学的なものとすれば, その反応速度は水温の上昇とともに加速されるはずであり, さきに例示した S.L Keer<sup>(13)(14)</sup> らの結果の  $50^{\circ}\text{C}$  以上における潰蝕量の減少は理解し難いものとなる。

これは次節に述べる考え方によつて容易に理解されるが, 理論的な取扱い<sup>(18)~(20)</sup>や考え方のいかんは別としても, 第15図および第16図に示したベークライトやガラスについての結果は, 水の物理的な衝撃作用がキャビテーションによる損傷の主因であることの直接的な説明と

考えられる。ペークライトがベンチュリー法でも損傷を受けることは、H. Schröter<sup>(9)</sup>によつても確められている。

### (2) 崩壊過程との関係

第18図は、フィックスド・タイプ・キャビティの崩壊過程と損傷との関係についての筆者の考え方を、試験片の上下運動と関係づけて、概念的に示したものである。

第1段階は試験面上昇に伴いフィックスド・タイプ・キャビティの形成される期間であり、試験用水の蒸気圧や試験片の上下運動の最大振幅などにより形成されるキャビティの大きさは異なりうるが、これらの条件が一定な場合には、各周期毎にほぼ同程度のキャビティが形成されるものとする。第2より第4段階までは、試験面の降下に伴う外圧の上昇によつてキャビティの崩壊する期間である。その初期の第2段階では、微少界面の振動によつて加速された水の衝撃もフィックスド・キャビティによつて緩衝され、材料の損傷に直接関与しない期間である。

たとえば第14図下段の写真に示されるように、フィックスド・キャビティが細粒化によつて崩壊してかなり薄くなり、衝撃作用が緩衝作用に打克つような第3段階に至り初めて損傷を受けるといのである。つぎの第4段階は、フィックスド・キャビティが完全に飛散し尽した後の期間であり、静水圧的な水圧の上昇のみで損傷には関係がなく、最下位に降下後は再び上昇に移つて同じ過程が繰返される。

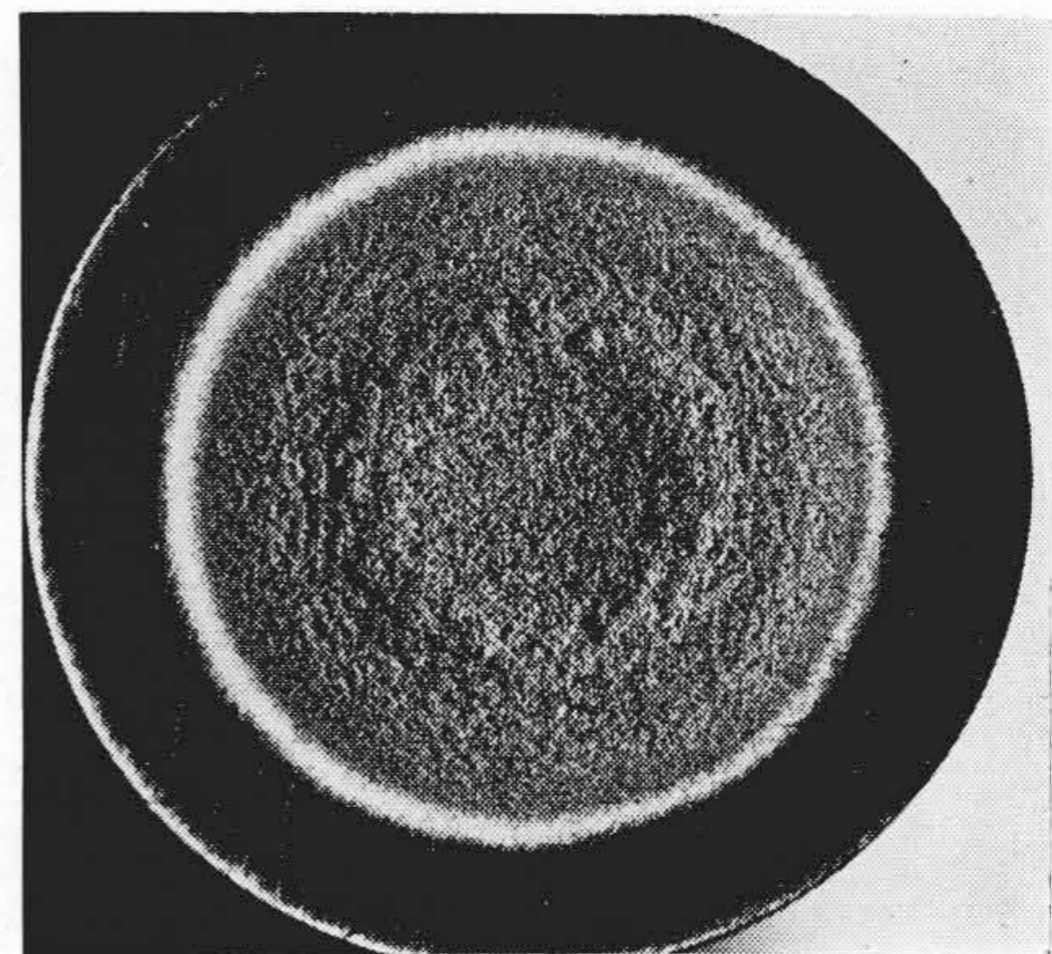
この過程のうち第3段階の開始時期や期間の長さは、第1段階で形成されるキャビティの大きさや崩壊の速さによつて変りうることはもちろんであり、さきに示した S.L. Keer の結果は、水温の上昇とともに逐次第4段階の方にずれ、ついにはつぎの周期の第1段階とラップするものとして容易に理解される。また第1段階におけるキャビティ内圧の急変も材料の損傷に直接関与するものと考えられるが、その程度はあきらかでない。

### (3) 潰蝕面の形状について

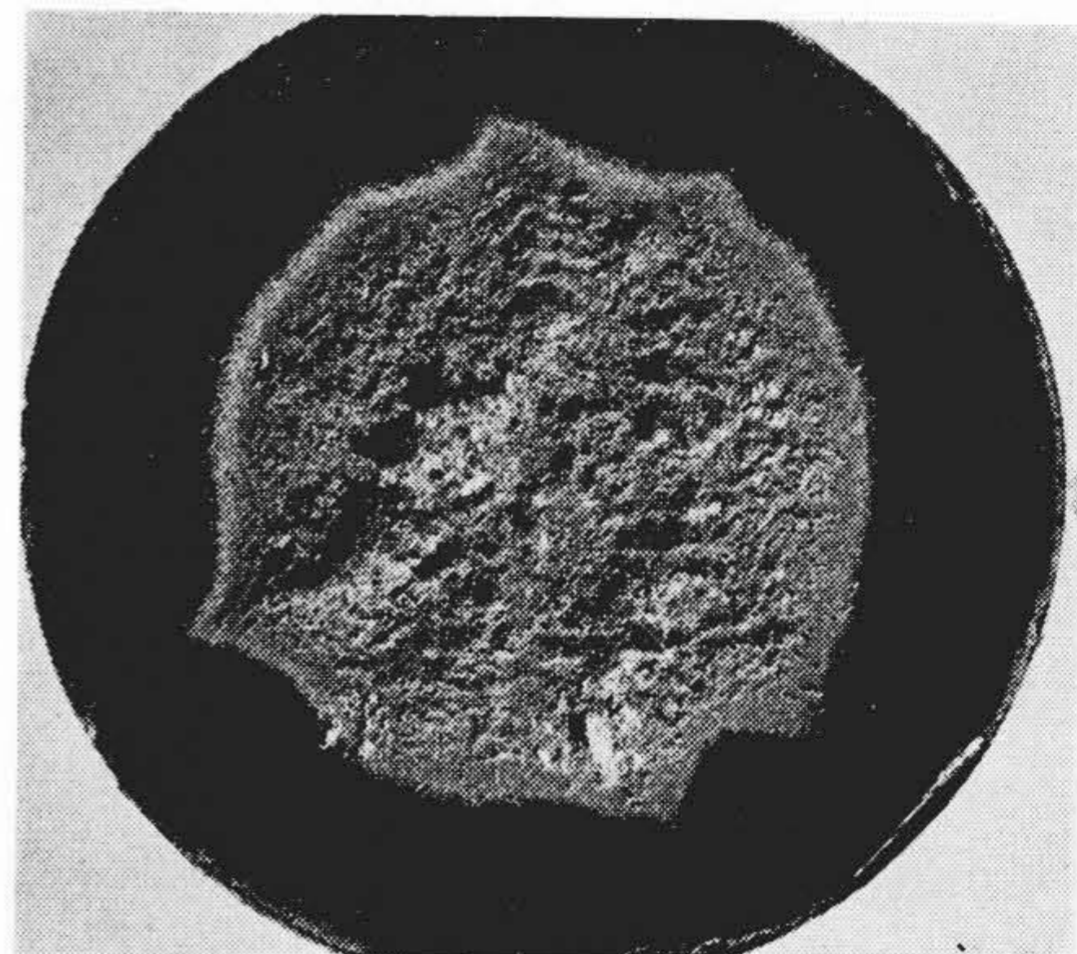
磁歪振動法による潰蝕面は、すでに発表<sup>(13)~(15)</sup>された多くの写真から知られるように、種々な外観を呈し、その外縁部はいずれも侵されない部分を有する。これらの実験的な事実を損傷機構と関係づけていかに解釈するかという問題がある。

第19図は、材質の均一性と潰蝕面の特長との関係を代表的な例について示したものである。いずれも 13% Cr 不銹鋼であるが、一方が組織的にも均一であるのに反し他は大きフェライトの出た不均一なものである。

この外縁部が侵されないおもな理由は、さきに述べた



均一なソルバイト組織のもの



ソルバイト中にフェライトの大きく分布したもの

第19図 組織的均一さによる潰蝕面の差異 (13%Cr 鋼)

Fig. 19. Difference of Erosion Figures by Structural Uniformity (13%Cr Steel)

ように、中央部と周辺部との変化の速さの差異によるものと解釈される。すなわち一般の繰返し曲げ応力による金属材料の応力—繰返し衝撃回数曲線で見らるるように、この種の衝撃応力による疲労破壊でも疲労限のような値が存在し、これ以下の応力を受けている外周部では、同じ回数の衝撃を受けても損傷を生じないという考え方である。

各部分についての微分的な衝撃の強さの変化ならびに分布は、試験条件が同じである限り、統計的には各周期ごとにほぼ同様と考えられるので、被試験材の耐潰蝕性によつて潰蝕部の面積が異なることや、材質的に不均一な試験面では同心円的な形がくずれることなどの事実は、この考え方により良く説明される。

またこのようなピストン面の近距離音場についての H. Backhaus および F. Trendlenburg<sup>(24)</sup> の理論的研究における干渉縞との類推から、定常状態でなくても部分的に速さの異いうることや、均質な材料の潰蝕部の中央附近に同心円的なやゝ彫りの深い部分ができることも理解される。

## 〔V〕 結 言

磁歪振動式キャビテーション・エロージョン試験法における現象の瞬間写真による観察から、キャビテーションによる損傷機構、キャビティの崩壊過程および二、三の実験事実について考察し崩壊過程と損傷との関係について新しい一つの考え方を提唱するとともに、二、三の金属材料についての試験例を紹介した。その結果本試験法におけるキャビテーションは流体機械におけるフィックスド・タイプと呼ばれるものと本質的には同じであり、その損傷作用は、おもにキャビティ気液界面の各微小部分の非常に周期の短い振動によつて加速された水の物理的衝撃によることがあきらかにされ、また従来あまり明確な解釈の与えられていなかった二、三の実験事実も、新しい考え方により観念的ではあるが無理のない説明が与えられることが知られた。

したがつて本試験法がたとえ実地の条件より苛酷であることも、今後この種の試験結果の集積によつて材料の耐潰蝕性改善が期待され、また複雑<sup>(23)</sup>な実動機械の損耗の問題を考える上にも参考になるう。

なお、この試験法による材料の研究は引続き行われているが、これらの実験室的な結果と実地の状況との対比については特に強い関心を有するものであり、すでに発電所側の理解ある御援助により現地試験を開始したところもある。今後この種の機会がさらに与えられることにより、流体機械材料の技術面がいつそう進歩することを期待している。

本研究は日立製作所日立研究所小野健二博士の御指導の下に日立製作所日立工場水力関係、原料部門関係を初め日立研究所金属、物理、電気関係各位の御援助により行われているもので、これらの方々に厚く感謝の意を表わすとともに、特に高速写真撮影に便宜を与えられた島史朗博士ならびに熱心に実験を援助された花井照明、石川光男両君に謝辞を捧げる。また本研究の発表を許可せられた工場ならびに研究所幹部の方々に厚く御礼を申上げる。

## 参 考 文 献

- (1) 鈴木, 石橋, 辻: 金属 23, 323~ (1953-5) 特集 “水車は刻々喰われている”
- (2) 沼知他 7 名: 金属学会講演概要 108~ (1955-4) 第 3 分科会主題 キャビテーション・エロージョン
- (3) 早川, 臼井: 金属防蝕技術総覧 下巻, 429~ (昭 27 日刊工業新聞社)
- (4) 重野: 防蝕技術資料 2, 319~ (1953) Sea Horse Inst. 1951 大会の Cav. Erosion に対する討議の抄録
- (5) R.T. Knapp: Preprint for Annual Meeting (A.S.M.E.) No. 54-A-106 (Nov. 1954) “Recent Investigations of the Mechanics of Cavitation and Cavitation Damage”
- (6) M. S. Plesset, A. T. Ellis: 同上, Paper No. 54-A-76 (Nov. 1954) “On the Mechanism of Cavitation Damage”
- (7) 山辺: 日立評論 35, 103~ (昭 28-4) “水の衝撃による金属の腐蝕”
- (8) 三好, 栄: 金属学会講演 No. 196, 197 (昭 30-4)
- (9) H. Schröter: Z.V.D.I. 77, 865~ (1933) “Korrosion bei Kavitation”
- (10) M.V. Schwary, W. Mantel: Z.V.D.I. 80, 863~ (1936)
- (11) 斉藤: 機械学会論文集 9, No. 3 57~ (昭 18)
- (12) N. Grossman: A.S.T.M. Bu., 61~ (1952-7)
- (13) S.L. Keer: Tr. A.S.M.E. 59, 374~ (1937) “Determination of the Relative Resistance to Cavitation Erosion by the Vibratory Method”
- (14) W.J. Rheingans: Tr.A.S.M.E. 72, 705~ (1950) “Accelerated Cavitation Research”
- (15) J. C. Hansaker, H. Peters: Tr. A. S. M. E. 57, 423~ (1935)
- (16) N. Gains: Phys. 3, 209~ (1932-10) “A Magnetostriction Oscillator Producing Intense Audible Sound and Some Effects Obtained.”
- (17) 拔山: 電気音響機器の研究 229~ (昭 23 丸善)
- (18) Lord Rayleigh: Phil. Mag., 34, 94~ (1917) “On the Pressure Developed in a Liquid During the Collapse of Spherical Cavity”
- (19) S.S. Cook, C.A. Parsons: Engineering 107, 501, 515 (1919)
- (20) M. Kornfeld, L. Suvorov: J. App. Phys. 15, 495~ (Jun. 1944) “On the Destructive Action of Cavitation”
- (21) 沼知: 機械学会講演予稿 No. 423 (昭 30-4) “翼型のキャビテーションが発する超音波第 1 報”
- (22) 小堀, 横山, 高田: 日立製作所亀有工場研報 No. 323 (昭 30-2) (部外未発表)
- (23) 下手, 沢田, 大谷: 金属学会誌 19, 209~ (昭 30-3)
- (24) H. Backhaus, F. Trendlenburg: Z. Tech. Phys., 7, 630~ (1926)