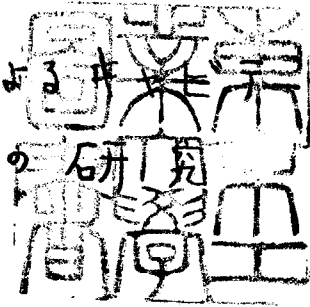


論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	磁歪振動法によるキャピテーション・エロージョンの研究
Title(English)	
著者(和文)	津田健
Author(English)	KEN TSUDA
出典(和文)	学位:工学博士, 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第630号, 授与年月日:1973年7月11日, 学位の種別:課程博士, 審査員:
Citation(English)	Degree:Doctor of Engineering, Conferring organization: , Report number:甲第630号, Conferred date:1973/7/11, Degree Type:Course doctor, Examiner:
学位種別(和文)	博士論文
Type(English)	Doctoral Thesis

磁歪振動法による#シオン・エロージョン



津 田 健

東京大学 353387

目 次

第 1 章	緒 論	1
1.1	緒 言	1
1.2	既往の研究	3
1.3	研究の目的と方針	14
第 2 章	実験装置および方法	17
2.1	磁歪振動法実験装置	17
2.2	試験片および試験材料	21
2.3	実験条件および実験方法	22
第 3 章	損傷速度の経時変化	30
3.1	緒 言	30
3.2	実験結果および考察	31
3.2.1	損傷速度の経時変化	31
3.2.2	損傷速度と損傷状態の関係	32
3.2.3	硬度分布の経時変化	34
3.3	結 論	36

第4章	損傷に及ぼす温度、振幅および振動数の影響	47
4.1	緒言	47
4.2	実験結果および考察	47
4.2.1	温度の影響	47
4.2.2	振幅の	48
4.2.3	振動数の	50
4.3	結論	52
第5章	損傷に及ぼすコロージョンの影響	62
5.1	緒言	62
5.2	実験装置および方法	63
5.3	実験結果および考察	63
5.3.1	損傷に及ぼすコロージョンの影響	63
5.3.2	コロージョンとエロージョンの相互作用	66
5.4	結論	74
第6章	試験片形状の影響	96
6.1	緒言	96
6.2	試験片	97
6.3	実験結果および考察	97
6.4	結論	101

第 7 章	キャビテーション損傷機構	108
7.1	緒 言	108
7.2	実験結果および考察	108
7.3	結 論	113
第 8 章	総 括	117
	謝 辞	121
	使用記号	122
	引用文献	123
	付 録 (ウオータートンネル法における キャビテーション損傷)	128

第1章 緒論

1.1 緒言

金属材料の流動液による腐食(コロージョン)は、実際の化学装置・機械において重要な問題となっており、すでにかんりの研究が行なわれている。しかし、流動液が比較的高速で流れる場合には、コロージョンのみならず、エロージョンによる損傷も重要となる。事実、高速流体を取扱う工業装置においては、コロージョンとエロージョンが同時に生じている場合が多く、このような場合の装置材料の寿命を決定するには、コロージョン、エロージョンの両者を考慮に入れねばならない。そのためには、まず各々の機構を明らかにする必要がある。

エロージョンには、キャビテーションによるもの、液滴の衝撃によるもの(rain erosion)、サンド・エロージョンのように固体粒子の衝突によるものなど多種あるが、この中でもとくにキャビテーションによるものは、ポンプ、バルブ、スクリューなど実際の装置・機械においてしばしば遭遇し、コロージョン環境中で生じる場合にはその損傷がとくに激しいことなどが大きな問題となっている。

キャビテーションとは、流体の速度が増し静圧が液

の蒸気圧程度にまで下がることにより、流体中にキャビティ（気泡・空洞）を生じる現象である。かくして生じた気泡が急激に崩壊すると、理論的には数百乃至数千気圧にも達する衝撃圧を発生する。この衝撃圧のために材料が損傷を受ける。これがいわゆるキャビテーション・エロージョンといわれている現象である。

キャビテーション・エロージョンの機構に関して種々の試験装置を用いてかなり多くの研究が行なわれているが、いまだ普遍的結論は出されておらず、これら試験法によって得られたデータから実際の場合の耐キャビテーション性も予測するまでには至っていない。これは、各試験法によってキャビテーションの発生状態やその強度などが異なるためであると考えられる。

したがって、キャビテーションによる材料の損傷機構に対する普遍的結論を得るためには、個々の試験法について、十分な研究がなされるべきであると思われる。

1.2 既往の研究

キャビテーションに関する研究は古くからな行なわれてゐるが、大別するとつぎの三つになる。

- 1) キャビテーションの発生機構,
 - 2) 材料の耐キャビテーション性およびキャビテーション損傷機構,
 - 3) 実際の装置(ポンプ、タービン等)を用いた研究.
- このうち、3)は本研究の範囲外であるので省略し、以下1), 2)について述べる。

1.2.1 キャビテーション発生機構

初期において、キャビテーションは液と物体との相対速度が増し、静圧がその液温における蒸気圧以下に低下すると、局部的な沸騰を起すために生ずる現象であると考えられていた。しかし、この見解はHunsaker¹⁾や沼知²⁾によつて改められた。すなわち、沼知は、キャビテーションは静圧がその液における空気飽和圧以下になつて初生するものであり、その初生条件は空気含有量によつて異なることを明らかにした。一方、Knapp³⁾は含有空気よりむしろ微細な気泡のまま存在するいわゆるフリーガスに注目し、この気泡核に水蒸気が拡散してついにキャビテーションを発生すると述べている。いずれにしても、溶解ガスおよびフリーガスの両者ともキャビテーション初生に影響することは確が

で、Holl⁴⁾は、これら両者を各々測定し検討することの必要性を指摘している。

以上の蒸気泡の発生、溶存ガスの遊離の他に、液体の破壊強度以上の力が働くことにより、液体中に空孔を生じること、キャビテーション発生の原因となり、これらに関しては、Temperley⁵⁾の理論的報告、Briggs⁶⁾の実験的報告がある。

1.2.2 材料の耐キャビテーション性およびキャビテーション損傷機構

A) 試験法

キャビテーション損傷機構についても、種々の試験法でかなりの報告が行なわれているが、いまだ普遍的な機構の解明はなされておらず、この原因の一つは、前節でも指摘したように、各試験法により、キャビテーションの状態や強度が異なるためと考えられる。

そこで、一般に用いられているキャビテーション・エロージョンの試験法をまとめてみると Table 1-1 のようになる。

7~9)
 a) ウォータートンネル法：高速流体の流れるトンネル中に球や翼型の物体を置くもの、曲り管を用いるものがこのタイプに属し、実際の装置に比較的近い状態でキャビテーションを生じさせ得ることから、損傷を与える

には長時間要するにもかかわらず重要な試験法である。

b) ベンチュリー法¹⁰⁾ : ベンチュリー部に試験材料を取り付け、キャビテーション損傷を与えるものである。

c) 回転円板法^{11)~13)} : 穴をあけた円板を回転させることにより穴の近傍にキャビテーションを生じさせるもので、その強度は種々の試験法のうち最も大きな部類に属するという報告¹³⁾もある。

d) プロペラ法^{14) 15)} : 回転翼に試験片を取り付け液中で回転させるもので、実際条件に近い条件で実験ができるため、船用プロペラ材料の研究に適している。

e) 磁歪法^{16)~21)} : 磁歪効果と利用し、試験片と液中で激しく振動させ、その表面にキャビテーションを発生させるものである。

f) 電歪法^{22) 29)} : 磁歪法が振動子として磁歪物質を用いているのに対し、この方法はチタン酸バリウムのような電歪物質を用いるものである。

g) 超音波焦点法³¹⁾ : 超音波の焦点に試験片を静置し、その表面にキャビテーションを生じさせるもので、試験片が運動しない点が特長である。

h) 噴射水法³²⁾ : 試験片を高速で回転する円板の周囲に取り付け、ノズルを通して円板に対し垂直方向から噴射するジェット水を試験片が切るようにした装置で、噴流を切る際に圧力の急変を生じ、その部分にキャビテーションを生じさせるものである。

1) 液滴衝撃法^{30~35)} : 小さな液滴を高速で物体に衝突させるもので、一般のキャビテーションとは損傷機構が異なると考えられるが、液滴と気泡の挙動に注目し、この装置と磁歪法による損傷との比較検討を行なった研究もある。

さて、本研究で用いる磁歪法について、ささにくゆしく述べる。磁歪法は Hunsaker (1935)¹⁶⁾ が開発し、その後 Kerr¹⁷⁾ により本格的に使用され種々の材料に対するデータが発表されている。この試験法は、他の装置に比べて装置が簡単で試験片も小さくてすみ、短時間で損傷を与えられるうえ、データの再現性も良いため、キャビテーションの迅速試験法としては最適と考えられ、広く用いられている。(Table 1-2にその例を示す) そのため、Robinson³⁰⁾ ささには最近 Hammitt²⁹⁾ により試験法の規格を作るうとする試みがなされている。

試験片表面の形状に関して、Plesset³⁶⁾ は平円板状の試験片では損傷状態が一様でなく再現性にも乏しいことを示し、周囲にリムをつけた皿型の試片を用いることにより良い再現性が得られたと報告している。また広津²⁶⁾ はリムの代わりに表面に小さなみぞをつける方法を提唱している。一方、Thiruvengadam や Waring^{37) 38)} は十分長い試験時間で実験を行なえば、平円板状のものでも皿型のものでも、ほぼ同程度の再現性が得られる

ことを示している。

B) キャビテーション損傷機構

前述した種々の実験法によりキャビテーション損傷機構を解明すべく古くから研究が行なわれてゐるが、大別すると液側に重点を置いたものと、材料側に重点を置いたものに分類できる。

1) 液側に重点を置いたもの

材料がキャビテーションによって損傷を受けるのは、気泡が急激に崩壊する際の衝撃圧によるものと考へられ、気泡の挙動について多くの研究がなされてきた。

気泡の崩壊にともなつて発生する衝撃圧について最初に理論的取扱ひも行なつたのは Rayleigh³⁹⁾ である。彼は非圧縮性無限流体中で球状の気泡が消滅する場合について、流体中の任意の場所における瞬間的な圧力変化および気泡が消滅するに要する時間を理論的に導いた。これによると気泡径が初めの $\frac{1}{20}$ に収縮した場合その境界近くでの衝撃圧は無限遠方での1260倍にも達することになる。

一方 Plesset⁴⁰⁾⁴¹⁾ は Rayleigh の機構によると衝撃圧は気泡壁からの距離とともに急激に減少することから、気泡は材料のごく近傍になければならず、この場合気泡は球型を保つたまま収縮することはできないと考へ、気泡の崩壊時には液のジェットが形成され、この衝突

により損傷を受けるとした。NaudeとEllis⁴²⁾は、気泡を固体壁に付着した欠球状のものとして解析し、気泡はその球面部が気泡の内側へ突出し液噴流となって壁に激突するという理論解を得ている。Benjamin⁴³⁾も気泡が物体に衝突する際の高速度写真による観察から、気泡内部へ向うマイクロジェット存在を示している。またKornfeld¹⁸⁾も、磁歪振動法を用いて気泡の挙動も写真観察することにより、気泡の収縮はせいぜい3~5倍程度であるから、気泡による破壊作用は液の直撃によるものであるとしている。

以上は、気泡の挙動に関する研究であるが、この他損傷に影響を与えるものとして、蒸気圧、粘度、表面張力などの液の物性がある。Ivany⁴⁴⁾は、これら諸因子の衝撃圧に及ぼす影響に関して理論的な考察を加えている。またPlesset⁴⁵⁾は有機液体と、Garcia²⁸⁾は液体金属と用いた実験を行ない、それぞれ水液の物性面からの検討を行なっている。さらにHunsenとRasmussen⁴⁶⁾による溶存ガス量の影響に関する報告もあるが、これら液の諸因子がどのような影響を及ぼすかを定量的に説明するまでにはいたっていない。

ii) 材料側に重点を置いたもの

Hunsaker¹⁾はベンチュリー法を用い、キャビテーションにより鉛がへこむことを観察し、損傷は純機械的なものであると述べている。

Boetcher¹⁷⁾は、金属の硬度とキャビテーション損傷との密接な関係に注目し、通常金属の疲労限は硬度によって示されることから、キャビテーション損傷は疲労によるものであると主張した。Leiths²⁰⁾も損傷の潜伏期間は腐食疲労限度に比例することも示し、損傷には疲労が関与すると述べている。

一方 Knapp⁸⁾はウォータートンネル法で試験片としてアルミニウムを使用し、気泡の発生崩壊とピット発生状態の関係を明らかにし、ピットは塑性変形が原因であり、ごく短時間で生じることから疲労によるものとは思えないと述べている。Rieger²⁵⁾も衝撃圧により格子欠陥を形成しつつ塑性変形すること、また試験時間の経過に伴って転位密度が増し、ついにはクラックの発生とみるに述べている。PlessetとEllis³¹⁾、PlessetとDevine²³⁾はX線により実際に塑性変形が生じていることを明らかにし、化学的効果は二次的意義を持つと述べている。Thiruvengadam^{38) 40)}は、この塑性変形を代表する物性としてひずみエネルギーを考え、耐キャビテーション損傷性とひずみエネルギーとが比例関係にあることを示した。

一方 Wheeler⁴¹⁾は磁歪振動法による軟鋼を用いた実験から、酸素を含まない蒸留水中では、機械的作用は腐食作用の約6倍であるが、空気飽和の0.1N KCl水溶液

では約 $\frac{1}{2}$ に存することも明らかにし、この原因を塑性変形部がアノードとして作用するため腐食作用が加速される結果であると考えている。また、岡本⁵⁰⁾、加藤⁵¹⁾、Leith & Thompson²⁰⁾、Preiser & Tytell¹⁵⁾ によるとカソードプロテクションによりキャビテーション損傷を大巾に減少できることが明らかにされている。これらのことから、コロージョンは損傷に大きな影響を与えると考えられる。

さらに、損傷はキャビテーションのエネルギーで材料表面が高温となり⁵²⁾、水との化学反応が進行して生じるといふ報告⁵³⁾もある。

以上述べたように、損傷機構に関しては、機械的作用が主であるという考えと、化学的作用も重視すべきであるとする考えの二つがあるが、これらは互いに全く異なるものではなく、キャビテーションの強度の違いにより、ある場合は機械的作用が主となり、ある場合には化学的作用が主となるといったものである。Lichtman⁵⁴⁾ は回転円板法において、流速 60 ft/sec 以下では腐食が主であり、 $60 \sim 80 \text{ ft/sec}$ では両者が大略同等に作用し、 80 ft/sec 以上では機械的作用が主となると、流速により損傷機構が異なることを指摘している。また、Preiser & Tytell¹⁵⁾ も、作用する応力の違いにより、キャビテーション損傷機構にはつぎの三つの場合が考

えられると述べている。すなわち、

1) キャビテーション変形あるいは破壊：降伏点以上の力を受けて損傷を生じ、コロージョンは無視できる。

2) キャビテーション疲労：降伏点以下のくり返し応力による疲労から損傷を生じ、コロージョンの影響がかなり大きい。

3) キャビテーション・コロージョン：キャビテーションの力は弱く、コロージョンが支配的である。

の三つである。

Table 1-1. Cavitation test devices

High velocity flow test	{ a) Water tunnel b) Venturi
Rotary test	{ c) Rotating disk d) Propeller
Vibratory test	{ e) Magnetostriction f) Piezoelectric
Others	{ g) Acoustic Field h) Jet impact i) Drop impact

Table 1-2 Vibratory test devices

Researcher	Frequency (kHz)	Amplitude (mil)	Amplitude (μ)	Depth of immersion (in)	Depth of immersion (mm)	Diameter of T.S. (in)	Diameter of T.S. (mm)	Ref.
Hunsaker	8.5		10			5/8	(15.9)	(16)
Kerr	6.7		90	1/4	(6.4)	5/8	(15.9)	(17)
Kornfeld et al.	7.5		~20				18	(18)
Rheingans	6.5	3.4	(86)	1/8~2	(3.2~50.8)	5/8	(15.9)	(19)
Leith & Thompson	6.5	3.4	(86)					(20)
Thiruvengadam & Preisler	13~17	~2.5	(64)		(1.5~6.9)		(11~20)	(21)
Thoma	6.2						16	(22)
Plesset et al.	14	1.25~1.75	(32~44)			5/8	(15.9)	(23)
Hobbs	20	~3:0	(76)	0.125 ~0.185	(3.2~4.7)	5/8	(15.9)	(24)
Hammitt et al.	20	2	(51)	1	(25.4)	0.547	(13.9)	(28)
Rieger	20		45				17	(25)
Hirotsu et al.	22		30		13		16	(26)
Wiegand & Schulmeister	4.3~19		20~70				12~20	(27)

1.3 研究の目的と方針

前節でも述べたように、キャビテーション発生機構に関しては多くの研究が行なわれ、その解明もかなり進んでいるが、材料のキャビテーション損傷機構に対しては、まだ不明の点も多く、普遍的な結論を得るためには、個々の試験法について一層十分な研究がなされるべきである。

さらに、エロージョンに及ぼすコロージョンの影響については、実際の装置ではこれら両者が同時に生じている場合が圧倒的であるにもかかわらず、ほとんど解明されていない。

そこで、本研究では試験法として材料の耐キャビテーション性の迅速試験法として慣用されている磁歪振動法を採り上げ、この装置における損傷機構を解明し、あわせて化学装置において、とくに問題となっているエロージョンとコロージョンの相互作用を明らかにする目的で研究を行なう。

磁歪振動法において、損傷には塑性変形も伴うことはほぼ明らかと思われるが、それがどのような期間にどのように生じるかが等、まだ不明の点も多く、この試験法が広く用いられていることからその損傷機構の解明が重要であると考えられる。

本論文は計8章から成り、2章以下の構成はつぎの

通りである。

第2章では、本論文で採用した磁歪振動装置、試験片とくに試験材料について述べる。

第3章では、まず種々の材料について損傷実験を行ない、損傷量および損傷速度と時間との関係を明らかにし、磁歪振動法に特徴的な損傷速度の経時変化に注目し、その原因について検討する。

ついで第4章では、この損傷速度に影響を与えると考えられる因子（液温、振幅、振動数）を採り上げ、各々の影響を明らかにするとともに、損傷機構についての考察を行なう。

第5章では損傷に及ぼすコロージョンの影響につき検討を行なう。すなわち、コロージョン環境下でのキャビテーション実験を行ない、純エロージョンあるいは純コロージョンとの比較を行ないつつ、エロージョンとコロージョンの相互作用について検討する。

第6章では、本研究で採用した磁歪振動法を、より一般的なキャビテーション試験法とするために、損傷に及ぼす試験片形状の影響を明らかにするとともに、第4章とも関連させながら、損傷量と振幅、振動数、試験片直径との間の関係を明らかにする。

第7章では、以上の結果を総合的に検討し磁歪振動法における材料のキャビテーション損傷機構を明らかに

にする。

第8章では、得られた結果の総括を行なう。

なお、損傷機構の普遍的な結論を得るには、実際の装置における損傷との比較が必要となる。このために実際に近い状態で実験のできるウォータートンネル法を採用したが、この装置における気泡群の挙動、衝撃圧の発生機構等については、すでに末沢ら^(7) 50~58)によって明らかにされている。そこで、本論文では、とくにウォータートンネル法における損傷に注目し、付録として簡単に記す。

第2章 実験装置および方法

2.1 磁歪振動法試験装置

磁歪振動法は、一般に鉄、ニッケルあるいはコバルトその他の合金などの磁性物質を磁化すると、わずかなではあるがその寸法が変化するという、いわゆるジュール効果を利用したものである。磁性物質の棒に巻いたコイルへまず直流電流 I_{DC} を通じて長さ方向に静的磁化（偏奇磁化という）を与え、さらに交流電流 I_{AC} を重畳すると、棒の磁化は偏奇磁化 M_{DC} を中心として変動する。このように磁化が変化すればジュール効果によって棒が伸び縮みする。一定の I_{DC} , I_{AC} において (Fig. 2-1)

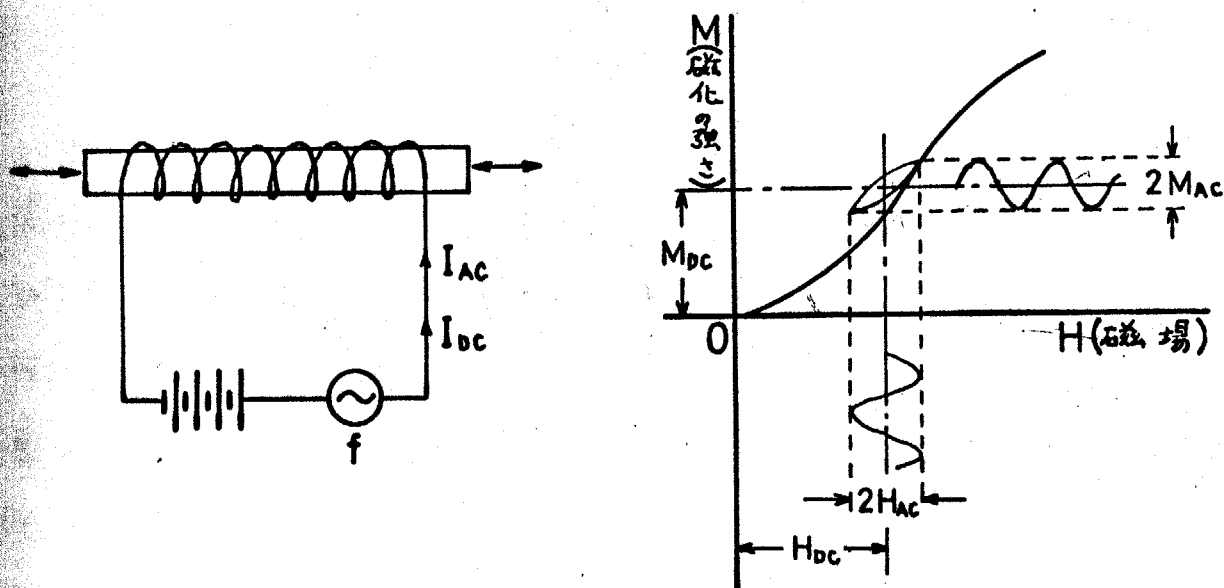


Fig. 2-1 磁歪振動の原理

交流電流の周波数が棒の共振周波数に一致すると、伸縮の振幅が最大となる。この伸縮の際に棒の端面から媒質中へ音波が放射され、その結果棒（振動子）の先端に取り付けた試験片表面に気泡の発生消滅がくり返えされてキャビテーション・エロージョンを生じる。

1.2節でも簡単に述べたように、この装置は、非常にコンパクトで、また試験片も小さくてすむこと、さらに実験条件の調整が容易で、したがってデータの再現性も良かったため、キャビテーション・エロージョンの迅速試験法としては最適といわれている。

本研究に用いた装置の系統図を Fig. 2-2 に示す。本実験装置は i) 高周波電流発生部 ii) 振動部 iii) 液循環部 の三つから成っている。

i) 高周波電流発生部

前述したように、振動子と大振幅で振動させるには、振動子の共振周波数に等しい周波数の高周波電流および偏奇磁化を与える直流電流が必要となる。本研究では、この高周波電流発生器および直流電源と内蔵した、東陽理工製作所製の超音波発振機を用いた。標準試験として採用した振動周波数は 10.1 kHz (出力 100 W) で、この他に 6.5 kHz (300 W)、 20 kHz (300 W) の装置も使用した。

ii) 振動部

この振動部は、振動子、ホーン、バイブロメータの三つから成っている。

a) 振動子：振動子としては、その共振周波数が 6.5, 10, 20 kHz の厚さ 0.125 mm のニッケル板とそれぞれ 100 ~ 300 枚積層したものを用い、その周りに 30 針のビニール被覆線と巻いてある。10 kHz の振動部の概略を Fig. 2-3 に示す。

b) ホーン：振動子のみでは振幅が小さくキャビテーションを生ぜしめるに至るため、ホーンによりその振幅を増幅する必要がある。用いたホーンは、いわゆる段付きホーンと呼ばれるもので、10 kHz の場合のものを Fig. 2-4 に示す。その増幅度は 6.5, 10, 20 kHz それぞれ 4, 4.8 倍である。またホーンは黄銅製で、振動子とは銀ろうにより接着した。

c) バイブロメータ

実験条件の最も基本的な因子として振幅がある。したがって実験中つねに振幅を監視し一定に保つ必要がある。この目的のためにバイブロメータによる方法を採用した。これは振動子の原理を逆に利用したもので、振動子の振動にともなうバイブロメータにひずみを生じ、その周りに巻いたピックアップコイルに電圧が誘起される。この電圧により振幅を監視するものである。バイブロメータとしては、振動子と同形状のニッケル

板を用い、振動子の上端に溶接してある。

振動部は振動の際に熱を発生するため、冷却水を周囲に流し一定温度(25℃)に保った。

なお以上の発振器およびバイブロメータ用の電源は、すべて定電圧装置と通し、一定電圧(100V)のもとで実験を行なった。

iii) 液循環部

試験液温度も一定に保つため、試験液を入れたビーカーの周囲に恒温槽で一定温度(±1℃)に保たれた水をポンプにより循環させた。(Fig. 2-2 参照)

2.2 試験片および試験材料

本研究で用いた標準試験片の形状、寸法を Fig. 2-5 に示す。これは Robinson³⁰⁾ によって提唱された ASME 標準案に基づいたもので、図のように直径 16φ の平円板状のものである。

試験片表面の形状に関しては、既往の研究の項で述べたように、データの再現性という点に関しては、平円板状あるいは皿型のどちらでもかまわぬが、損傷状態が均一である点に関しては皿型の方が望ましいと思われる。しかし皿型の場合、表面の仕上げあるいは工作がめんどろであるという大きな欠点がある。したがって本研究では、この欠点を補うために、図のような硬質塩ビ製のリング (Fig. 2-6) を試験片にはめこんで実験を行った。このリングをはめることにより、試験片表面の放射状流水を防ぎ、損傷状態はより均一になった。

また、試験片はすべて成形加工後、びびり取り焼鈍を行ない、グラップおよびパフ仕上げをして実験に供した。

本実験に用いた材料は、鉄、軟鋼、工具鋼、13Cr ステンレス、18Cr-8Ni ステンレス、鋳鉄、の鉄鋼材料 6 種で、その機械的性質、化学成分を Table 2-1, 2-2 に示す。このうち、とくに鉄を基準材として使用した。

2.3 実験条件および実験方法

1) 実験条件

実験結果に影響する因子とし、液温、振幅、振動数
 の他に、試験液の深さ、試験片の浸漬深さ、ビーカー
 の径などがあるが、これらに関しては Thiruvengadam's²¹⁾
 の報告を参考にし、いずれも損傷速度に影響を及ぼさ
 ないような条件に定めた。また、液温、振幅、振動数
 については、各々3~4点変化させた。これらをまとめて
 記すと下記の通りである。

液温 : 10°C, 25°C, 40°C, 60°C,

振動数 : 6.5±0.03 kHz, 10.1±0.5 kHz, 20.0±0.2 kHz

振幅 : 38 μ , 55 μ , 69 μ , 85 μ , (6.5 kHz)
 25 μ , 35 μ , 45 μ , 55 μ , (10.1 kHz)
 13 μ , 18 μ , 23 μ , 28 μ , (20.0 kHz)

試験液の深さ : 8~9 cm

試験片の浸漬深さ : 3 mm

ビーカー径 : 8 cm

試験液に関しては、とくに溶存空気量一定のもとで
 実験を行なう必要があるため、本研究ではつねに予め空
 気飽和した液を用い、^{44) 57)} 10~30分毎に新しい液と交換し
 た。また試験液としては、イオン交換樹脂を通した比
 抵抗 $500 \times 10^4 \Omega \cdot \text{cm}$ 以上の純水を用いた。

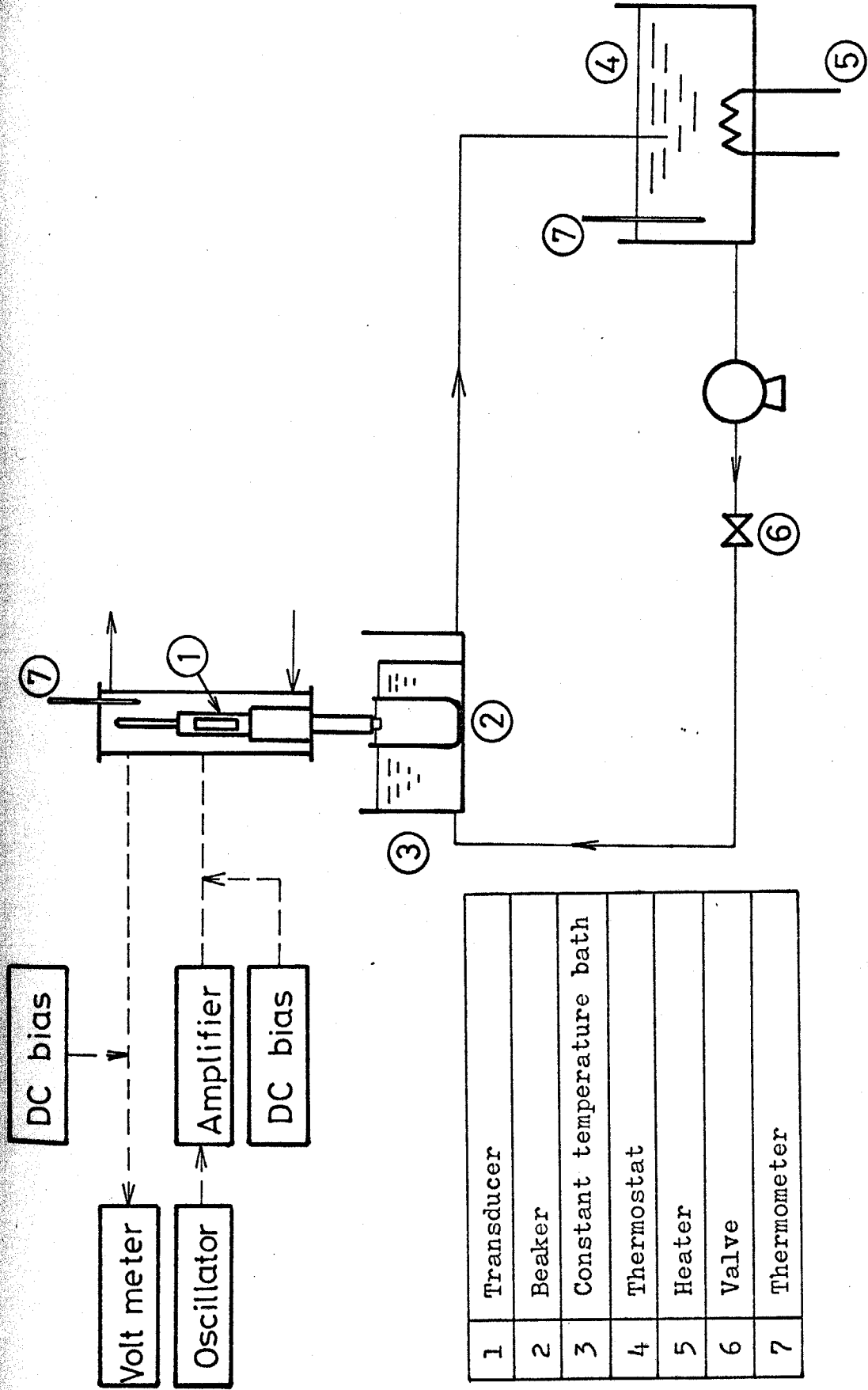
ii) 実験方法

試験片をホーンの先端にねじ込み固定し、リングをはめ、試験液中に水面下 3mm 没した状態で所定の振幅で振動させる。

試験開始後、60分までは10分おき、120分までは20分おき、以後30分おきに試験片を取りはずし、その時間(t)までの重量減少を化学天秤(精度 0.2 mg)により測定する。

実験中、液温は、試験液を入れたビーカーの周囲に恒温槽からの水を循環させることにより $\pm 1^{\circ}\text{C}$ の範囲で一定に保った。

実験後の試験片については、損傷断面の金属顕微鏡による観察、硬度分布測定などを行なったが、その際、損傷面の保護あるいは極く表面に近い部分での硬度測定を可能とする目的で、予じめ銅メッキを施した後、切断した。



1	Transducer
2	Beaker
3	Constant temperature bath
4	Thermostat
5	Heater
6	Valve
7	Thermometer

Fig. 2-2 Diagrammatic sketch of the magnetostrictive vibratory apparatus

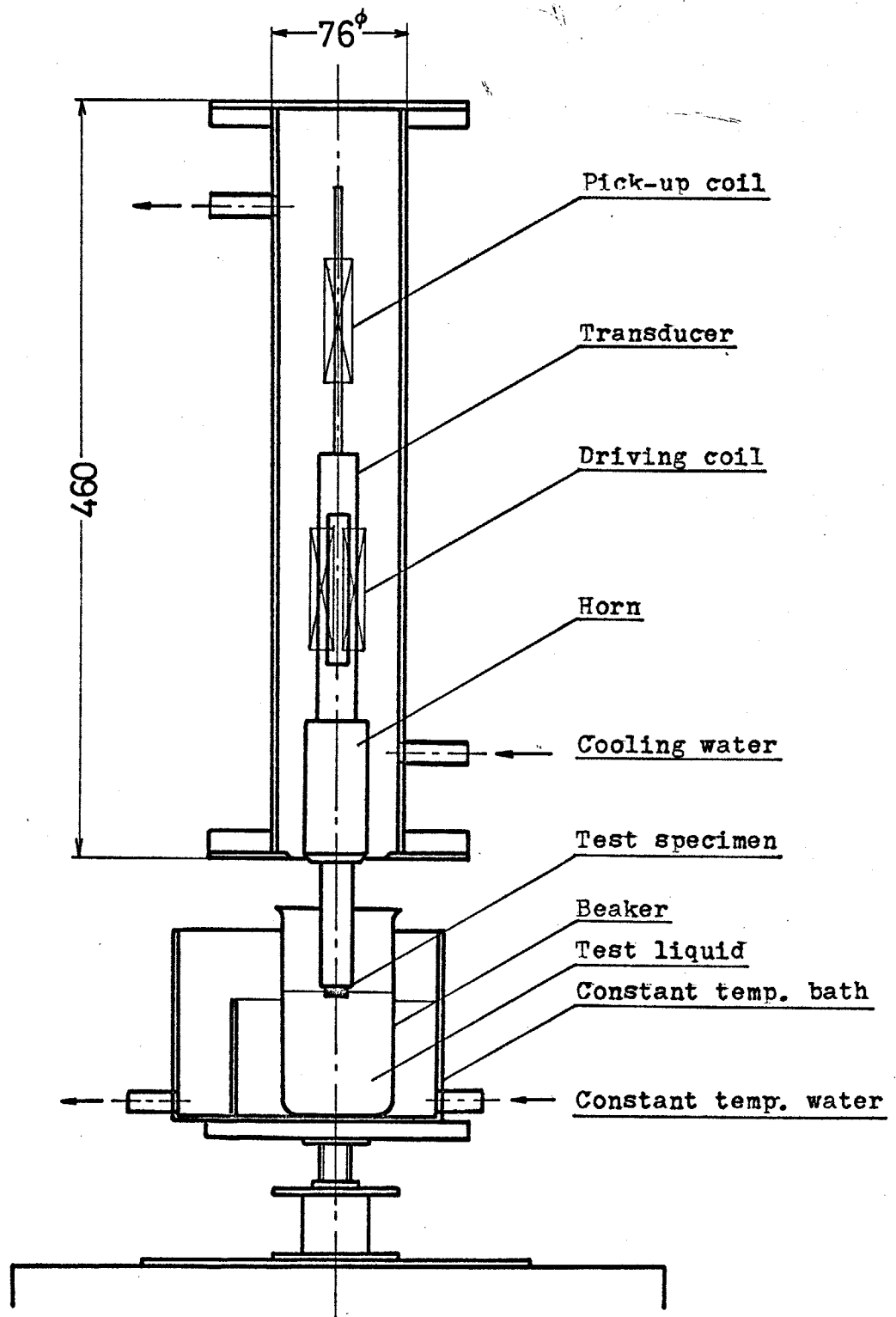


Fig. 2-3 Vibratory part (10.1 kHz)

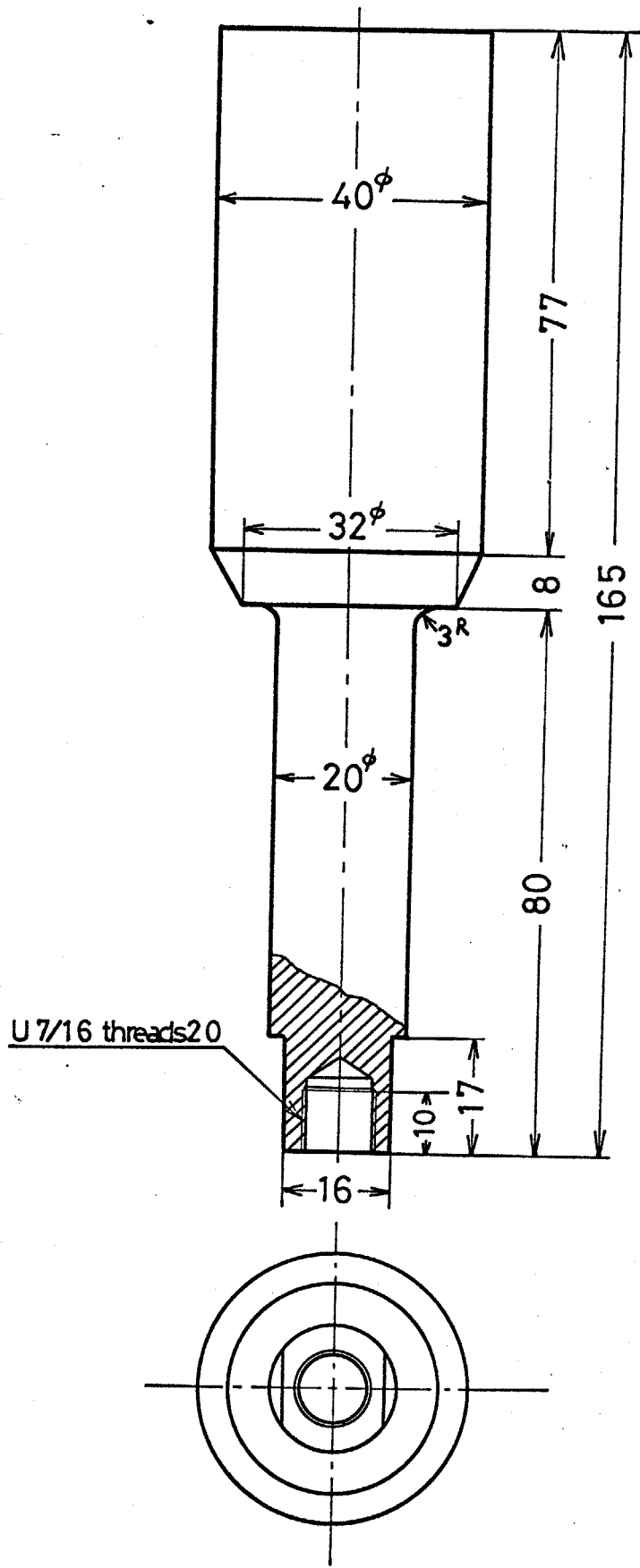


Fig. 2-4 Horn

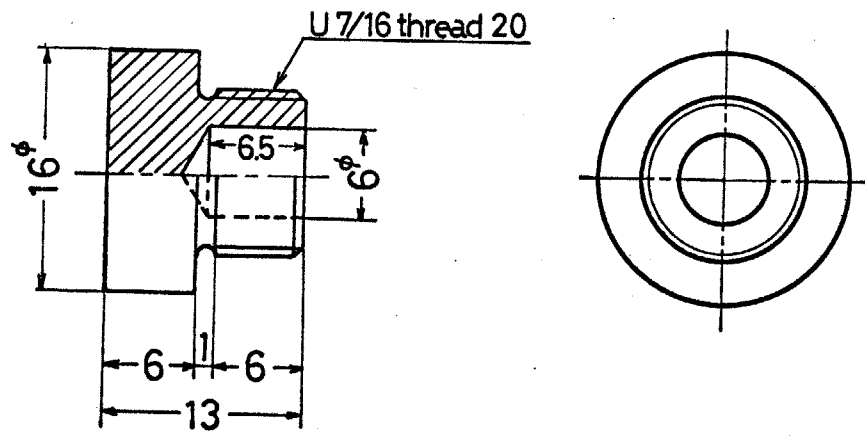


Fig. 2-5 Test Specimen

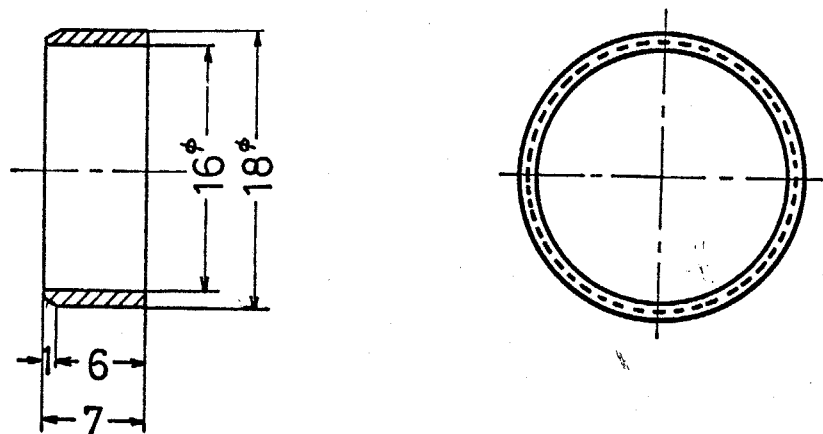


Fig. 2-6 Ring

Table 2-1 Chemical analysis(%)

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Al
Iron	0.014	0.013	0.05	0.018	0.013	-	-	-	0.35
Hypoeutectoid steel (Mild steel)	0.13	0.26	0.05	0.010	0.008	0.12	0.07	0.08	-
Hyperutectoid steel (Tool steel)	1.17	0.28	0.33	0.020	0.012	0.14	0.07	0.07	-
Cast iron	3.13	1.95	0.54	0.070	0.116	-	-	-	-
13 Cr (Stainless steel)	0.065	0.50	0.51	0.017	0.009	12.67	0.59	0.17	-
18-8 (Stainless steel)	0.05	0.57	1.61	0.033	0.015	18.58	9.13	0.14	-

Table 2-2 Physical properties

	Lower Yield point (kg/mm ²)	Upper Yield point (kg/mm ²)	Tensile strength (kg/mm ²)	Elongation (%)	Reduction of area (%)	Hardness	
						HRB	Hv(1.0)
Iron	33.3	-	28.9	59.0	78.0	46	108
Hypoeutectoid steel	33.3	33.8	47.1	35.5	66.9	71	146
Hypereutectoid steel	37.2	37.9	74.8	21.7	27.5	91	229
Cast iron	-	-	21.6	0.5	0.7	77	171
13 Cr	-	-	53.9	38.7	68.4	85	182
18-8	-	-	68.1	64.7	73.2	76	195

第3章 損傷速度の経時変化

3.1 緒言

磁歪振動法における損傷速度は経時的に（増加→減少→定常）と特徴的な変化を示す。これは、回転円板法、噴射水法、ベンチュリ法における場合と異なる点が指摘されており、またウォータートンネル法の水とも異なる⁶⁾。このため、損傷速度の経時変化について検討を加えることは、損傷機構を解明するためにも、大きな意義を持つと考えられる。

そこで本章では、この損傷速度の経時変化に注目し、この原因を明らかにするとともに、損傷機構について考察を行なう。

3.2 実験結果および考察

3.2.1 損傷速度の経時変化^{57) 58)}

6種の鉄鋼材料に対して損傷実験を行ない、損傷量 W と試験時間 t との関係を求める。その結果を Fig. 3-1 に示す。この $W-t$ 線図を見ると、鑄鉄のように脆い材料あるいは鉄のように軟かい材料は耐エロージョン性に乏しく、18Cr-8Ni ステンレス鋼のように延性に富むものあるいは工具鋼のように硬い材料が、耐エロージョン性の高いことがわかる。

この $W-t$ 線図を微分することにより単位時間当りの損傷量（損傷速度 R ）を求め、時間に対してプロットすると Fig. 3-2 が得られる。いずれの材料においても、損傷速度は経時的に（増加 → 極大 → 減少 → 定常）と変化するが、材料によってピークの高さあるいは損傷速度の最大値を保持時間に差がある。とくに、注目すべき点は、耐キャビテーション・エロージョン性に富む材料ほど、 $R-t$ 曲線 (Fig. 3-2) が平坦になる傾向にあることである。

このように、損傷速度が経時的に変化するのには、損傷機構が時間とともに変化するためと考えられる。

3.2.2 損傷速度と損傷状態の関係^{57) 58)}

キャビテーション損傷試験の結果，試験片表面の損傷状態が経時的に変化することから，前節で述べた損傷速度 R の経時変化は，この損傷状態と密接な関係があると予想される。

鉄に対する試験片表面の損傷状態の経時変化を Fig. 3-3 の写真に示す。30 min 程度でまず中央部に穴を生じ，60 min 程度から周辺部にも穴を生じ始める。また， R - t 線図が平坦になる 18Cr-8Ni ステンレス鋼では，120 min 程度で中央部，300 min 程度で周辺部に，それぞれ穴を生じ始める。このように R - t 線図の形状が異なる鉄と 18Cr-8Ni ステンレス鋼では，穴を生じ始める時間に大きな差がある。このことから損傷速度の経時変化は，損傷状態と密接な関連があると思われる。

この点をさらに明らかにするため，Fig. 3-3 の小穴の数および面積の経時変化を求めてみた。Fig. 3-4 にその結果を示す。 N は穴の数， a はその面積である。 N - t および a - t 線図のいずれも，時間的に一致する四つの期間 (a) (b) (c) (d) に分けられるのがわかる。

すなわち，最初の (a) 期間は，表面あざさのみが増し，大きな穴があく前の段階である。

つぎの (b) 期間に入ると，中央部に肉眼で認められる程度の穴を生じ，その大きさを増してゆく。

(c) 期間に入ると，中央部ばかりでなく周辺部にも穴

を発生し始め、その数および面積が急激に増加する。損傷速度 R が極大値を持つのもこの期間である。

さらに、時間が経過すると、すでに生じた穴の数はほとんど増加せず、その面積のみを増す (d) 期間となる。

以上、損傷速度の経時変化は、損傷状態が経時的に変化するものと密接な関係があることを明らかにしたが、その原因の一つとして、損傷状態の違いにより気泡群の挙動が異なることが考えられる。Fig 3-5 に、表面にまだ穴をほとんど生じていない場合と、穴が多数生じた場合における気泡群の挙動の写真を示す。これらの写真および高速度カメラによる観察から、穴を生じていない段階では気泡が試験片表面を激しく運動しているが、穴を多数生じた段階では、気泡は個々の穴にとじ込められた状態で発生・消滅をくり返すことがわかった。したがって、穴を多数生じた段階では、衝撃圧が緩和されるため、損傷速度は小さな値をとるものと考えられる。

3.2.3 硬度分布の経時変化

前節で、損傷速度の経時変化には、損傷状態の変化に伴う気泡挙動の違いが大きく影響していることも明らかにしたが、当然材料側の変化も予想できる。

いま、試験後 ($t=300$ min) の鉄の試験片について、ビッカース硬度計 (荷重 100 g) を用い、損傷断面の硬度分布測定を行なった。その結果を Fig. 3-6 に示す。試験前のものに比べて、損傷面近傍での硬度の上昇が認められる。これは塑性変形によるひずみ硬化の結果と考えられる。

そこで、この硬度分布に注目し、その経時変化を測定した。まず $t=5$ min での試験片表面から 30μ の深さにおける半径方向の硬度分布を示すと Fig. 3-7 のようになる。最初に穴のあく中心部と、つぎに穴のあく周辺部に硬度の上昇が認められる。この中央部と周辺部について深さ方向の硬度分布を経時的に示したのが Fig. 3-8 である。この図で、 H_v は各点における硬度の値、 $H_{v\infty}$ は表面から十分深い場所での硬度である。また \circ 印は中央部、 \triangle 印は周辺部における値を示す。測定時間は $5, 20, 50, 100$ min で、それぞれ (a) (b) (c) 期間に対応する。すなわち、 20 min 程度で中央部に穴を生じ、 50 min と 100 min の間で周辺部にも穴を生じる。

まず、中央部について検討すると、最初は硬度上昇の度合が急激に増すが、穴があく (b) 期間に入る) と、

その硬化の度合はしだいに減少する。また周辺部についても、同様に硬化の度合はしだいに増加し、穴があき始める(Ⓒ期間に入る)と減少し始めることがわかる。

以上の結果から、中央部、周辺部問わず水においても、まず塑性変形の進展に伴って硬度が上昇するが、ある程度硬化が進むと穴を生じ、一度穴(あるいはクラック)を生じると、大きな塑性変形を伴わずに損傷を生ずると考えられる。

このように、塑性変形が十分進展した時点で穴を生じるとすると、(a),(b)期間は、それぞれ中央部、周辺部で塑性変形が除々に進展する期間であると言える。この点をさらに確かめるために、つぎのような実験を試みた。すなわち、予じめ圧縮ひずみも加えた試験片を用いて損傷実験を行なった。(圧縮ひずみも加えたのは、キャビテーションにより圧縮応力を生じるためである。)試験片は、所定のひずみまで圧縮した材料から切り出し製作した。損傷穴面積 a を測定し、Fig. 3-4 に示すような $a-t$ 線図から t_{ab} ((a)(b)期間が終了する時間; Fig. 3-4 参照) を求め、予ひずみ(ϵ)との関係を検討した。Fig. 3-9 にその結果を示すが、図から明らかに、ひずみの材料においても予ひずみが大きいほど t_{ab} が小さくなることが認められる。すなわち、予じめ塑性変形を与えておくことにより、それだけ早く穴を生じること

である。この結果から、(a) (b) 期間は、塑性変形を除くに増す期間であるとする前述の考えの正しいことが確かめられた。

3.3 結 論

本章では、磁歪振動法において特徴的に認められる損傷速度の経時変化を採り上げ、その原因について検討を加え、つぎの結論を得た。すなわち、

- 1) 損傷速度の経時変化は、材料表面の損傷状態と密接な関係があり、損傷状態は穴の生じ方により経時的に四つの期間に明確に別けられる。すなわち、穴のあく前の段階で表面あざさのみを増す期間(a)、中央部に穴を生じその大きさをしだいに増す期間(b)、周辺部に穴を生じ始めその数および面積も急激に増す期間(c)、穴の数はもはや増加せず、その大きさのみを増す期間(d)、の四つで、鉄において損傷速度が最大になるのは(c)期間である。
- 2) 損傷状態が損傷速度に影響を与える原因の一つは、高速度カメラによる観察などの結果、気泡群の挙動が損傷状態とともに変化するためであることを明らかにした。
- 3) 損傷機構に関しては、損傷に先行して塑性変形を

を生じ、表面が硬化することも明らかにした。また
硬度分布の経時変化が、Fig.3-4に示す①、②期間
は塑性変形に伴い硬化を増す期間で、その終りで硬
化は最大となる。

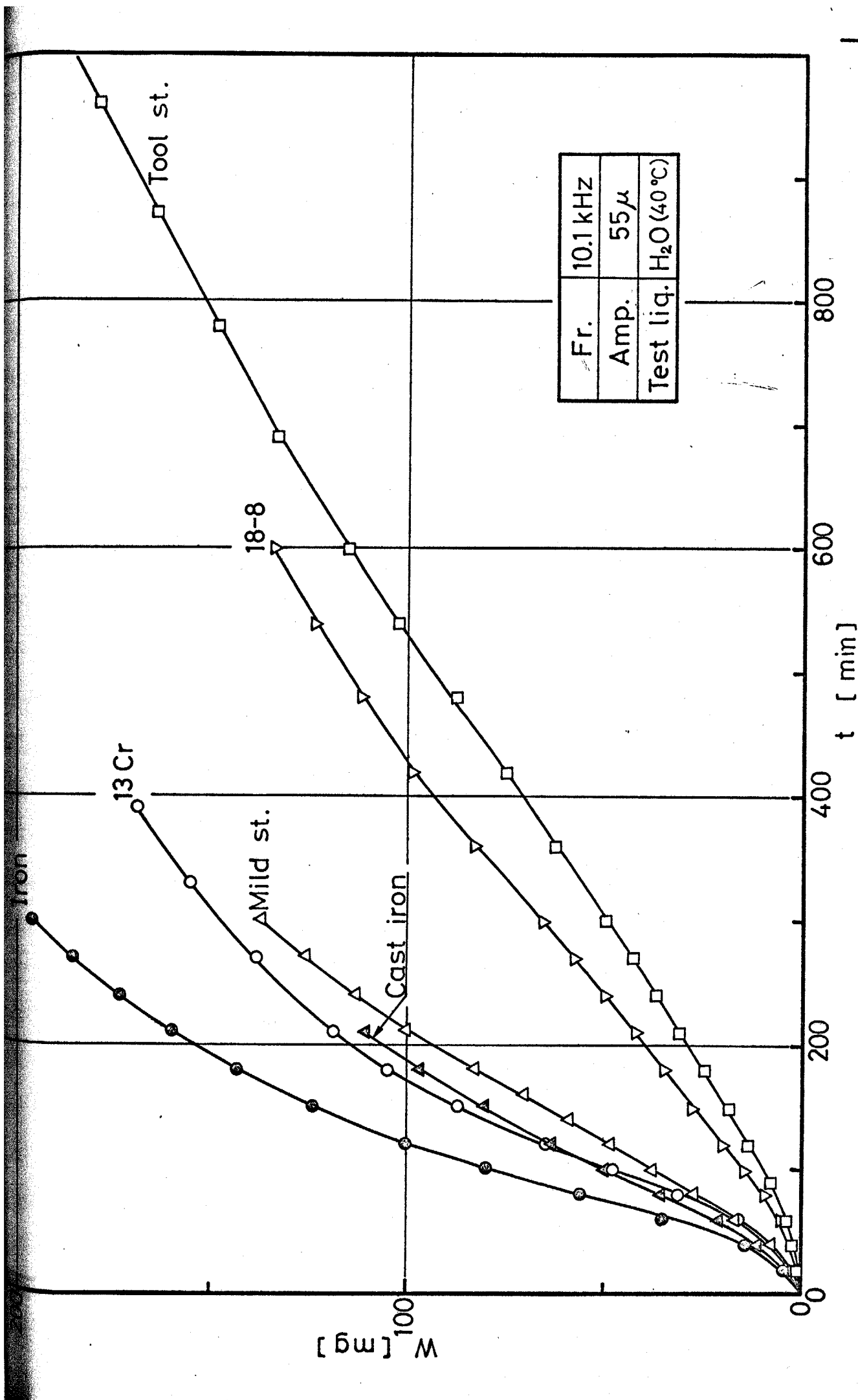
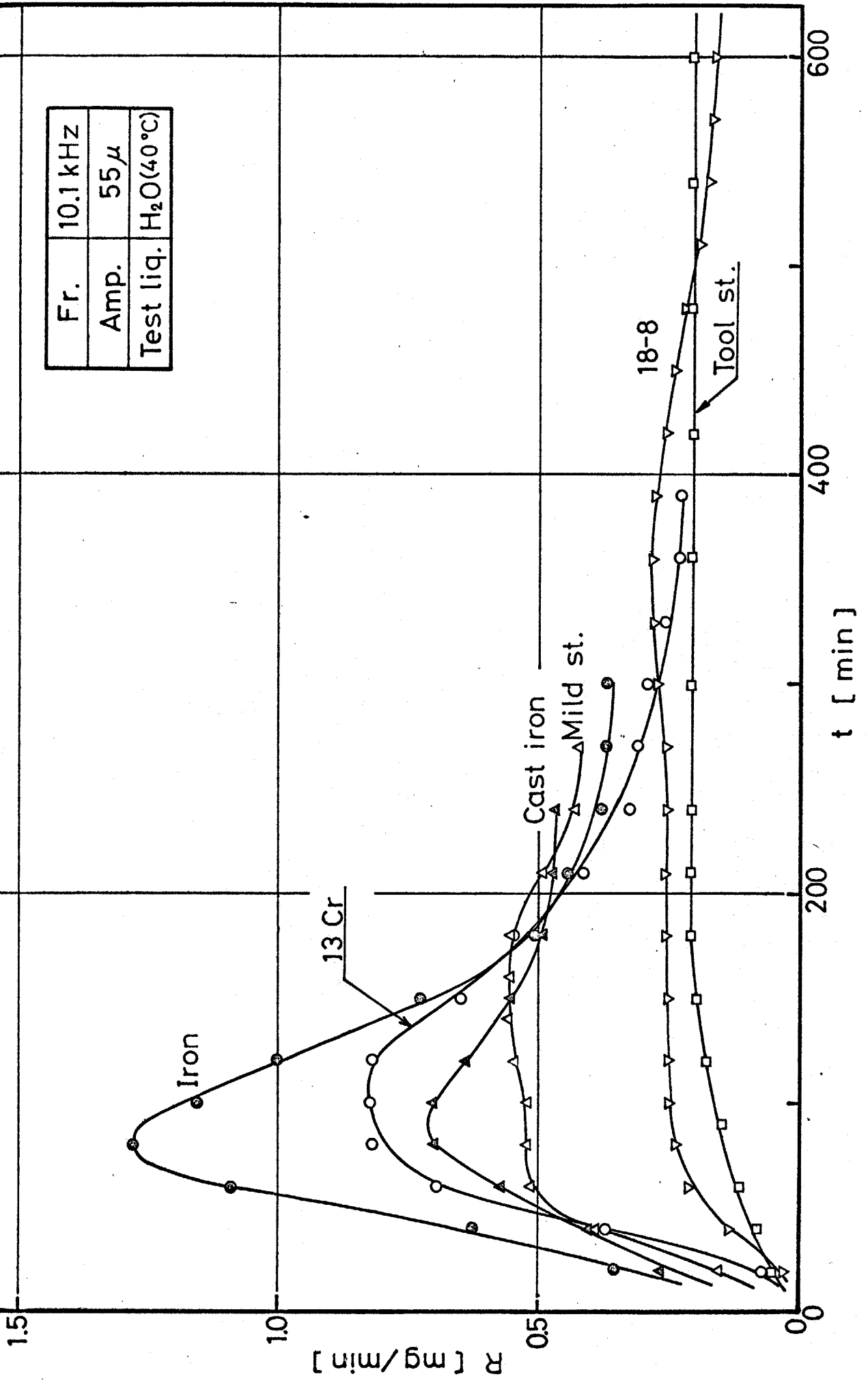


Fig. 3-1 Effect of test duration on weight loss for six metals



Fr.	10.1 kHz
Amp.	55 μ
Test liq.	H ₂ O (40 °C)

Fig. 3-2 Effect of test duration on rate of weight loss for six metals

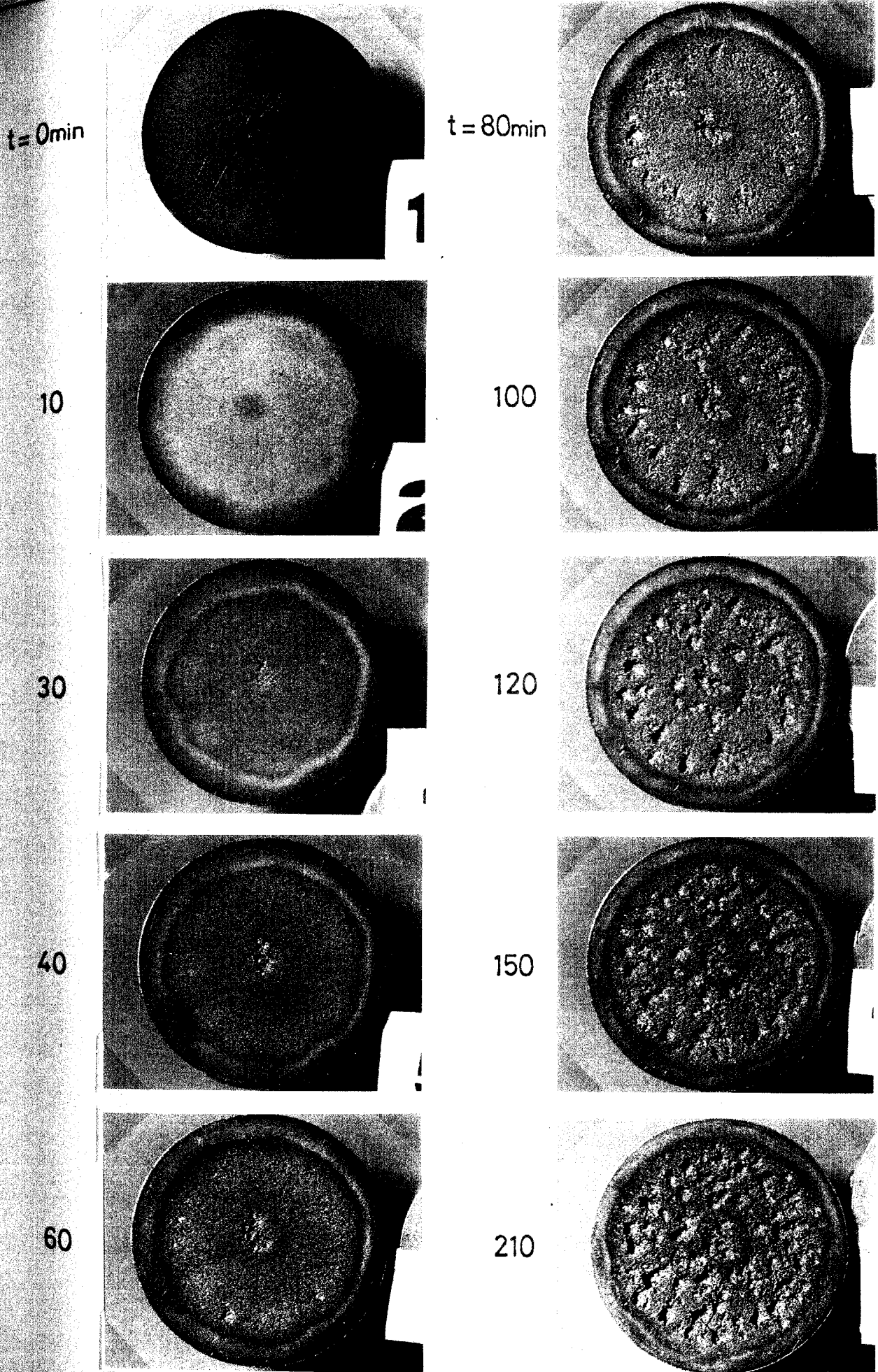


Fig. 3-3 Progressive change in the appearance of damaged surface of an iron with the lapse of time

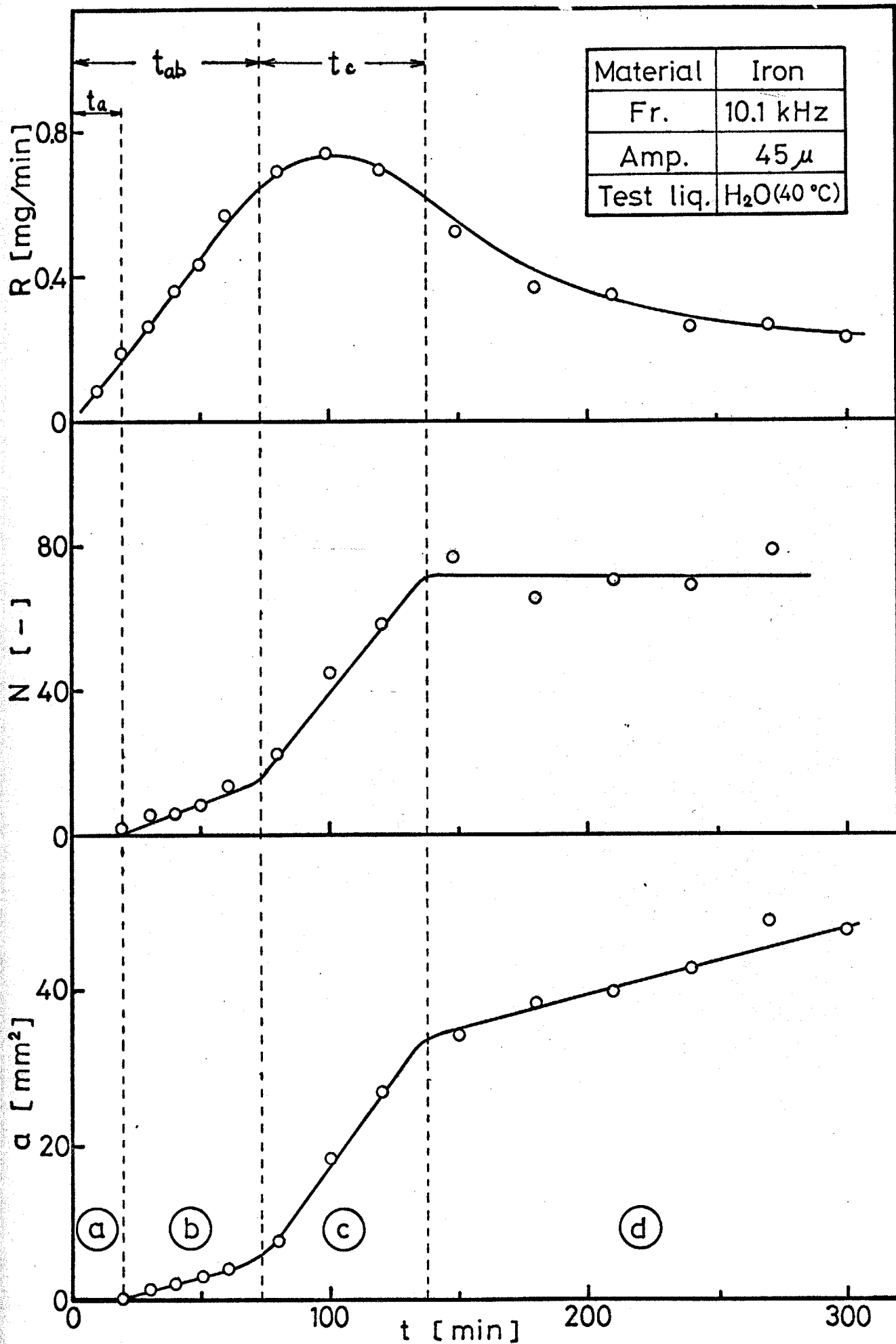
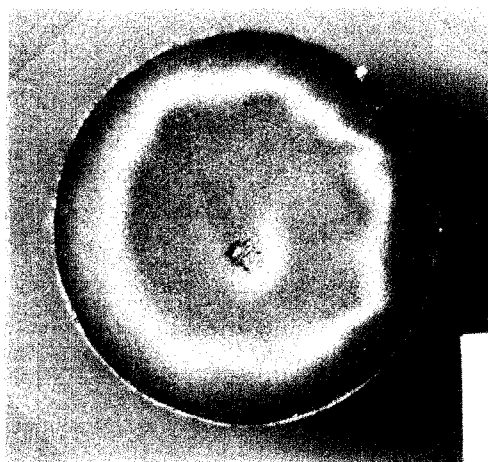


Fig. 3-4 Effect of test duration on area and number of eroded hole

Material	Iron
Fr.	10.1 kHz
Amp.	55 μ



Behavior of cavitation bubbles

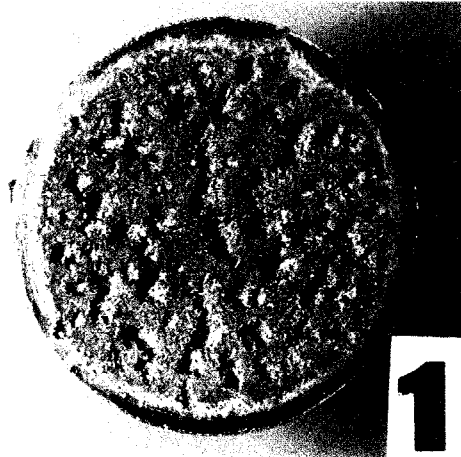


Condition of surface

t = 40 min



Behavior of cavitation bubbles



Condition of surface

t = 150 min

Fig. 3-5 Effect of surface condition on behavior of cavitation bubbles

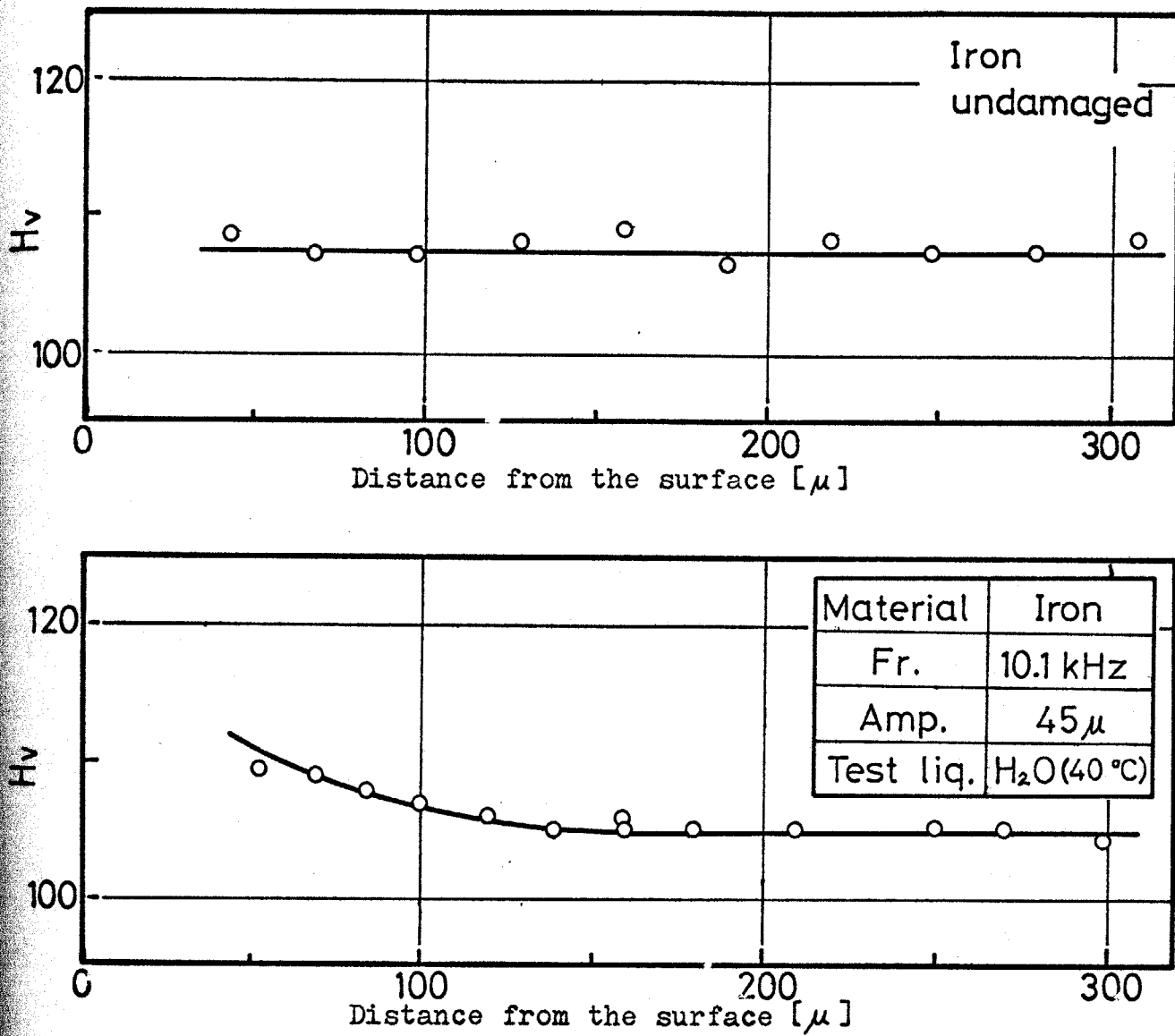


Fig. 3-6 Hardness distribution of specimen before and after cavitation test

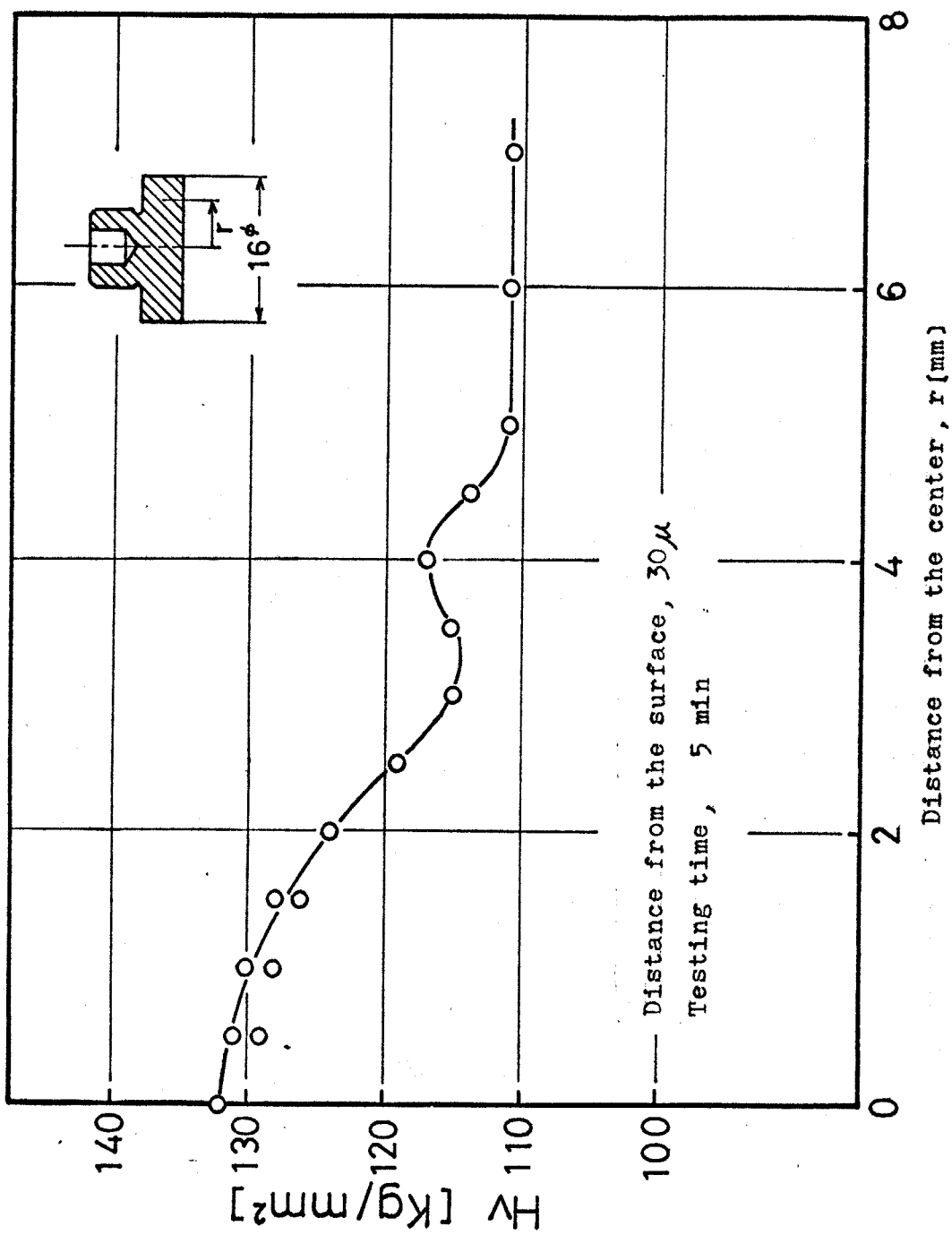
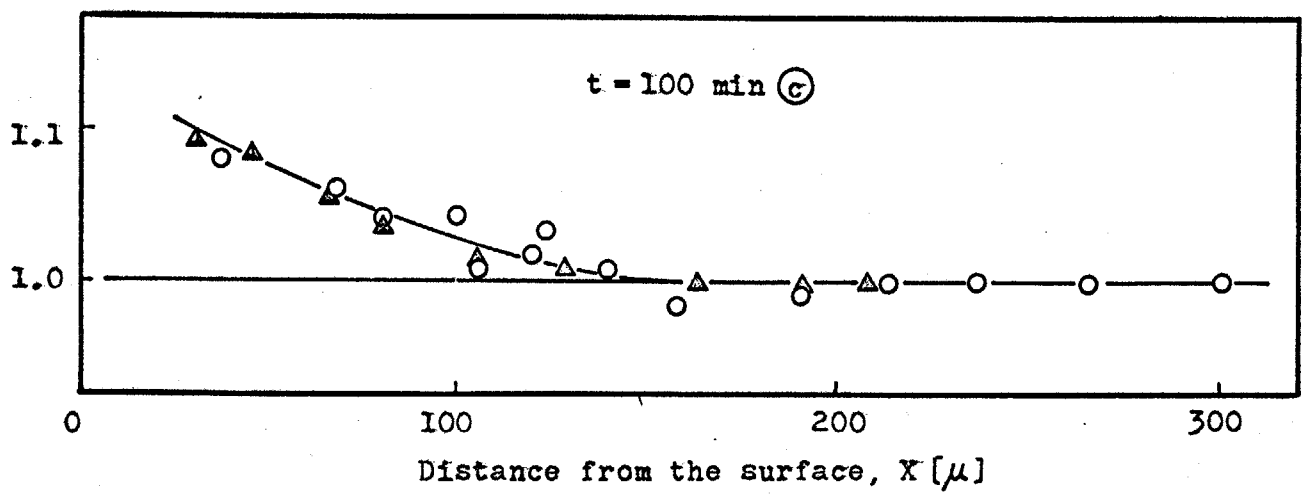
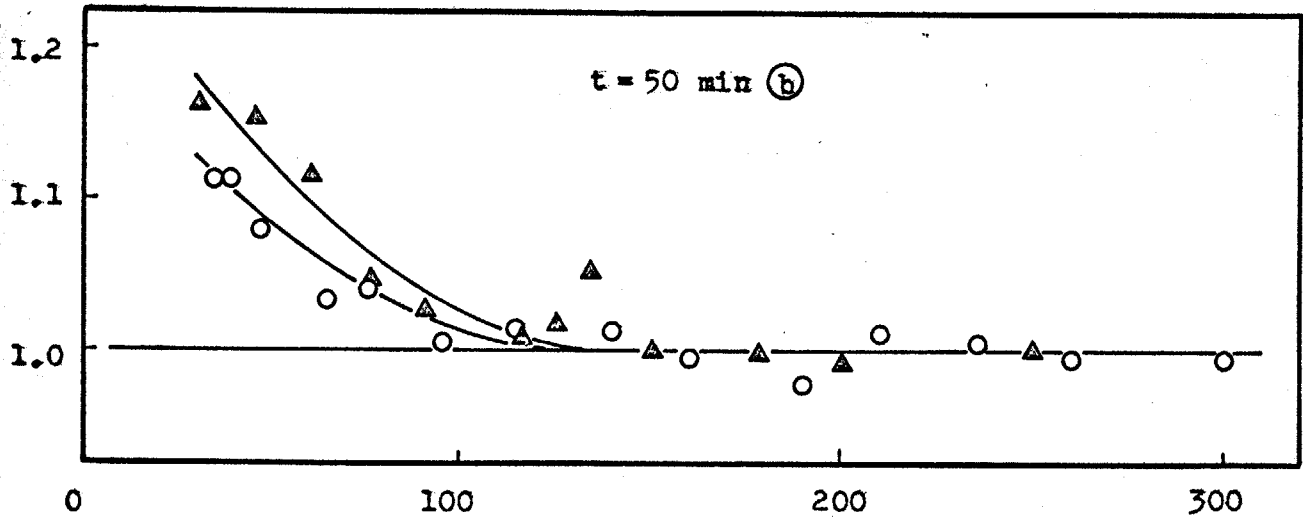
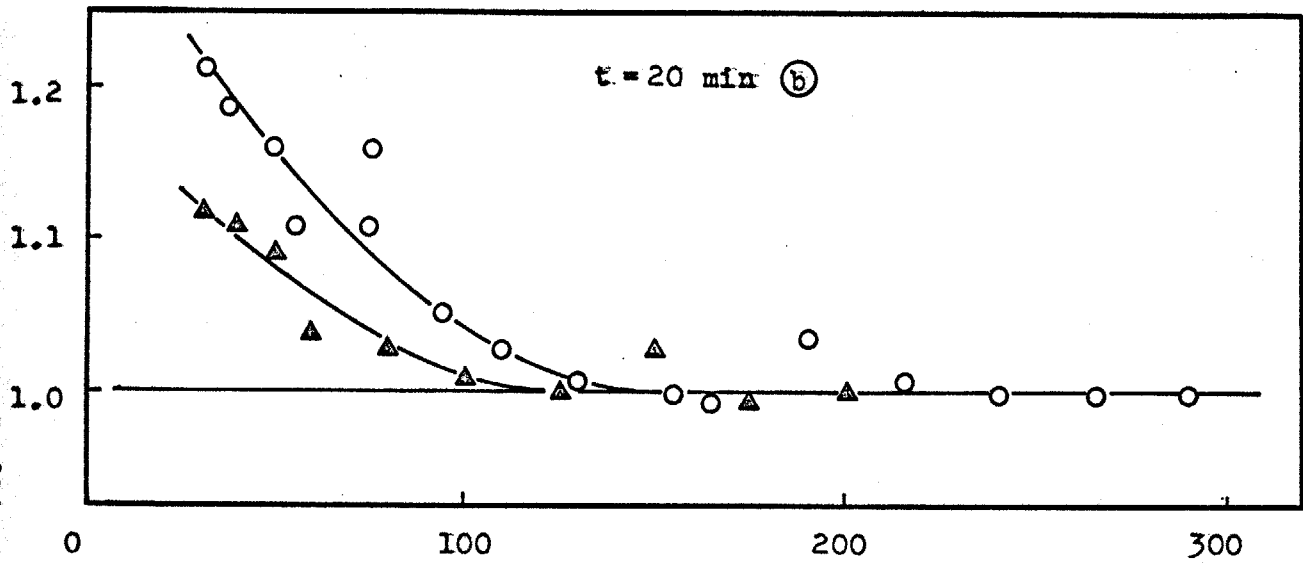
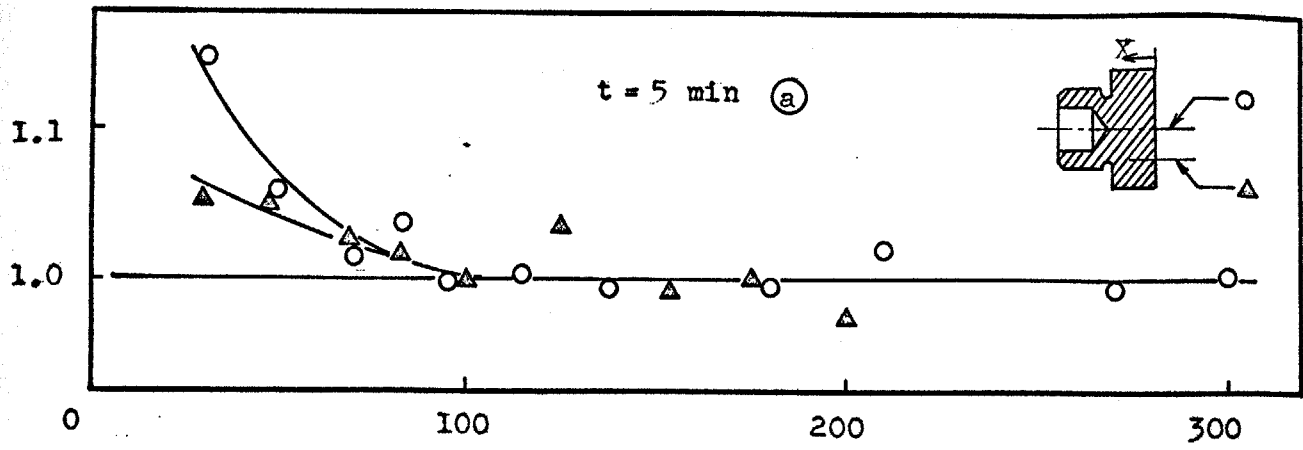


Fig. 3-7 Radial hardness distribution for iron

H_V/H_{V_0} [-]



Distance from the surface, X [μ]

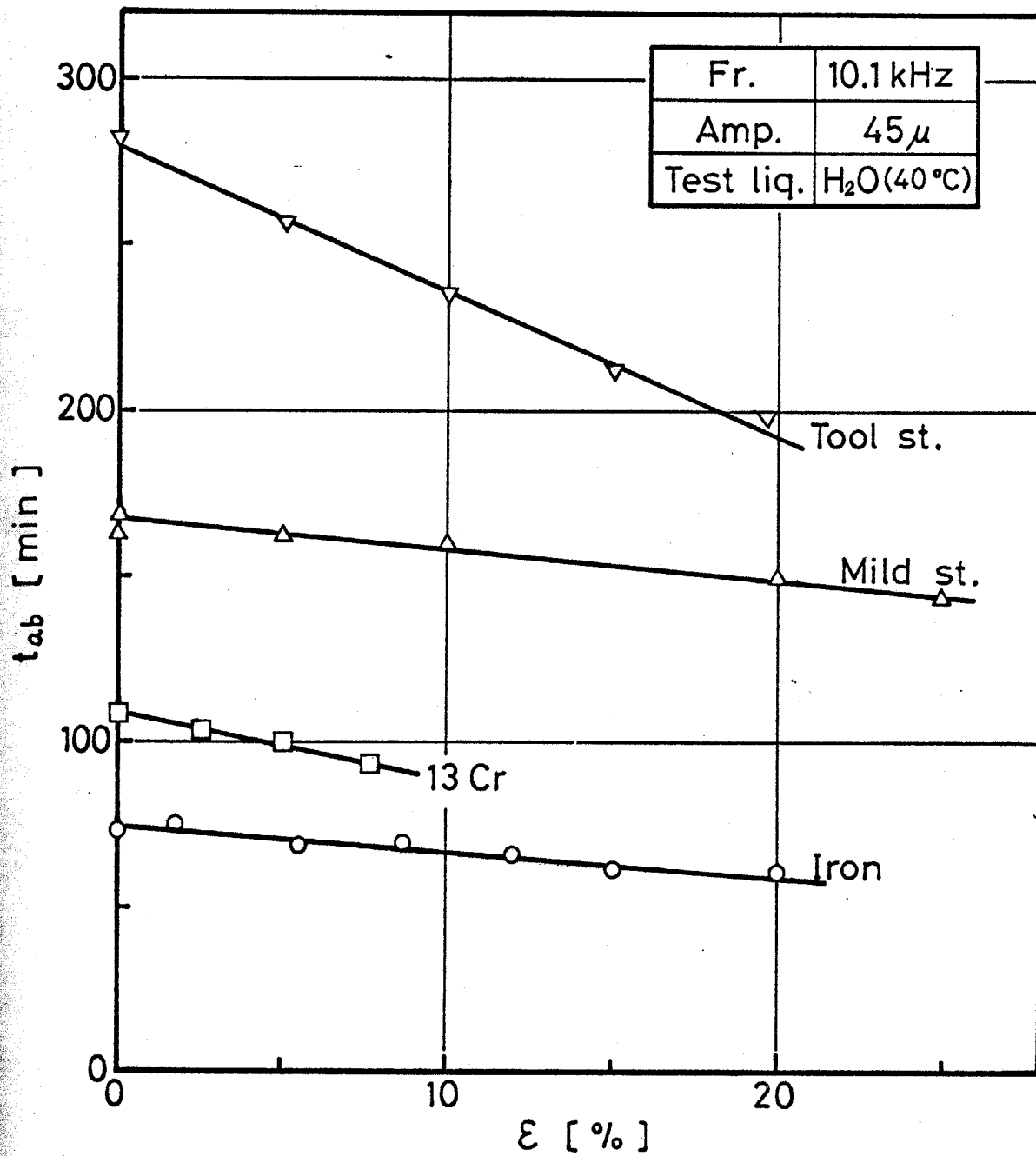


Fig. 3-9 Effect of prestrain on t_{ab}

第4章 損傷に及ぼす温度、振幅および振動数の影響

4.1 緒言

前章において、磁歪振動法でのキャビテーション損傷には塑性変形を伴うことも明らかにしたが、この塑性変形の度合はキャビテーション強度(振動数、振幅)、環境の温度によっても当然異なることが予想される。

そこで本章では、実験の基礎的な因子である温度、振幅、振動数を採り上げ、各々の損傷に及ぼす影響について検討する。

4.2 実験結果および考察

4.2.1 温度の影響^{57), 58)}

鉄に対し、試験液温度を 10° 、 25° 、 40° 、 60°C に変えてキャビテーション損傷実験を行なった。Fig. 4-1 にその結果を示すが、液温によりかなり複雑な挙動を示し、 55μ では 25°C で損傷量(W)が最大となるが、 35μ では温度の順に損傷量が増す傾向にある。

損傷に及ぼす温度の影響に関しては、材料の温度に対する挙動と、気泡群挙動への温度の影響(例えば、気泡核となる溶存ガス量の変化、溶存ガスあるいは液

の蒸気によるクッション作用⁶¹⁾、温度上昇に伴う気泡の崩壊過程の等温変化が^{61), 62)}のずれ、などが知られている)のニフが考えられ、Fig. 4-1はこれらニフの総合的な結果であると思われる。

Fig. 4-2に損傷断面の硬度分布に及ぼす温度の影響を示すが、硬度上昇の度合はわずかではあるが温度が高くなるほど大きくなる傾向にある。すなわち、高温になるほど損傷は、より延性的なものになることがわかる。この事実は、Table 4-1に示すように、塑性変形に関する t_{ab} (Fig. 3-4参照)が温度の上昇とともに増加することからも裏付けられる。

Table 4-1

(10 kHz, 55 μ , Iron)

T (°C)	t_{ab} (min)
10	65
25	65
40	70
60	78

4.2.2 振幅の影響

鉄のキャビテーション損傷に及ぼす振幅の影響を10 kHzの場合を例にとり Fig 4-4に示す。損傷量は振幅とともに増しているが、これは損傷に影響を及ぼすと考えられる諸量(放射エネルギー、圧力振幅など)がいずれも振幅とともに増すことを考えれば当然であ

る。したがって、振幅の増大とともに衝撃圧が増加するため、損傷はより脆性的なものになると予想される。Fig. 4-3 に硬度分布測定の結果を示すが、硬度上昇の度合は振幅増加につれ減少していることから、明らかに損傷は振幅増大に伴い、より脆性的な機構で生ずることがわかる。この事実は、温度の影響の場合と同様に、 t_{ab} が振幅の増大とともに減少することから裏付けられる (Table 4-2)。

Table 4-2
(10 kHz, 40°C, Iron)

Amp. (μ)	t_{ab} (min)
25	180
35	87
45	75
55	70

つぎに、損傷量と振幅の関係について検討してみる。振幅を変えて行った実験後の試験片を観察すると、Fig. 4-5 の写真に見られるように、振幅が小になるにつれ損傷穴の数はもちろん、損傷部の面積がかなり減少する。この損傷部の径を d とし、振幅に対してプロットすると Fig. 4-6 のように d は振幅 A のほぼ $1/2$ 乗に比例して変化する。したがって損傷量と振幅の関係と明らかにするにはキネマトーシヨの強度だけでなく損傷部面積をも考慮する必要があるが、この点については、第6章でさらに詳しく検討する。

4.2.3 振動数の影響

Fig. 4-4, Fig. 4-7, Fig. 4-8 に振動数を変えた場合の鉄の W-t 線図を示す。採用した振動数は 6.5, 10.1, 20 kHz の三つで、振幅は 10.1 kHz の 25, 35, 45, 55 μ の場合と等しい振動速度になる値（すなわち振動数 (f) \times 振幅 (A) が等しくなる値）を選んだ。

まず、振幅一定のもとでキャビテーション損傷に及ぼす振動数の影響を検討してみる。振幅 55 μ を例にとり、10 kHz の場合 (Fig. 4-4) と 6.5 kHz の場合 (Fig. 4-7) を比較してみると、両者にはその損傷量に大きな差があることがわかる。すなわち、振動数の影響がかなり大きいことも意味している。これは、振幅が等しくても振動数によりキャビテーション強度が異なるためである。

キャビテーション強度のみで考えると、 $f \times A$ が等しいれば損傷量も等しくなると予想されるにもかかわらず、Fig. 4-9 に示す通り、この場合も振動数により損傷量はかなり異なる。この原因は、振動数および振幅によって気泡群の拳動が違ってくるためと考えられる。

Fig. 4-10 に各振動数における損傷状態の写真を示すが、まず損傷穴の大きさに注目すると、振動数の増大に伴い損傷穴は小さくなる傾向にあることがわかる。これは、振動数が大きくなるほど気泡が発生してから消滅するまでの時間が短くなるため、消滅時の気泡径が小さいと考えられること、また各振動数における安定な

気泡径（共振気泡径）も振動数増大とともに小さくなること⁶³⁾などに起因するものと思われる。つぎに損傷状態の経時変化をみると、6.5 kHz、10 kHzでは比較的似ているが、20 kHzではかなり異なる状態を示し、まず周辺部から穴を生じ始める。このような損傷状態の振動数による違いは、試験片の表面に圧力振幅（衝撃圧）の分布が存在し、これが振動数により異なる結果、6.5 kHzおよび10 kHzでは中央部で、また20 kHzでは周辺部で最大衝撃圧を生ずるためと考えられる。

つぎに損傷速度と振動数の関係について検討してみる。Fig. 4-11 に各振動数における損傷速度に及ぼす振幅の影響を示すが、この場合も20 kHzにおいて他の振動数と異なる挙動を示す。したがって、損傷速度と振動数の関係を明らかにするには、気泡群挙動の違いも考慮に入れる必要がある。なお、これに関しては、振幅の影響の場合と同様、第6章で総合的に論ずる。

4.3 結 論

本章では、キャビテーション損傷に及ぼす基本的な因子である、温度、振幅、振動数の影響について検討し、下記の結論を得た。

- 1) 液温は、損傷に対して複雑な影響を与えるが、損傷断面の硬度分布測定および t_{ab} との関係から、高温になるほど損傷機構は延性的になることも明らかにした。
- 2) 損傷に及ぼす振幅の影響に関しては、振幅が小さいほど損傷機構は延性的になることも明らかにした。
また損傷部の面積は振幅に大きく影響され、その直径は、振幅の約 $\frac{1}{2}$ 乗に比例して変化することも示した。
- 3) 振動数の影響については、とくに 20kHz において他の場合と非常に異なる挙動を示すが、これは振動数により気泡の挙動が異なるためである。したがって、振動数と損傷速度の関係を明らかにするには、この気泡挙動の差を考慮に入れる必要があることも指摘した。

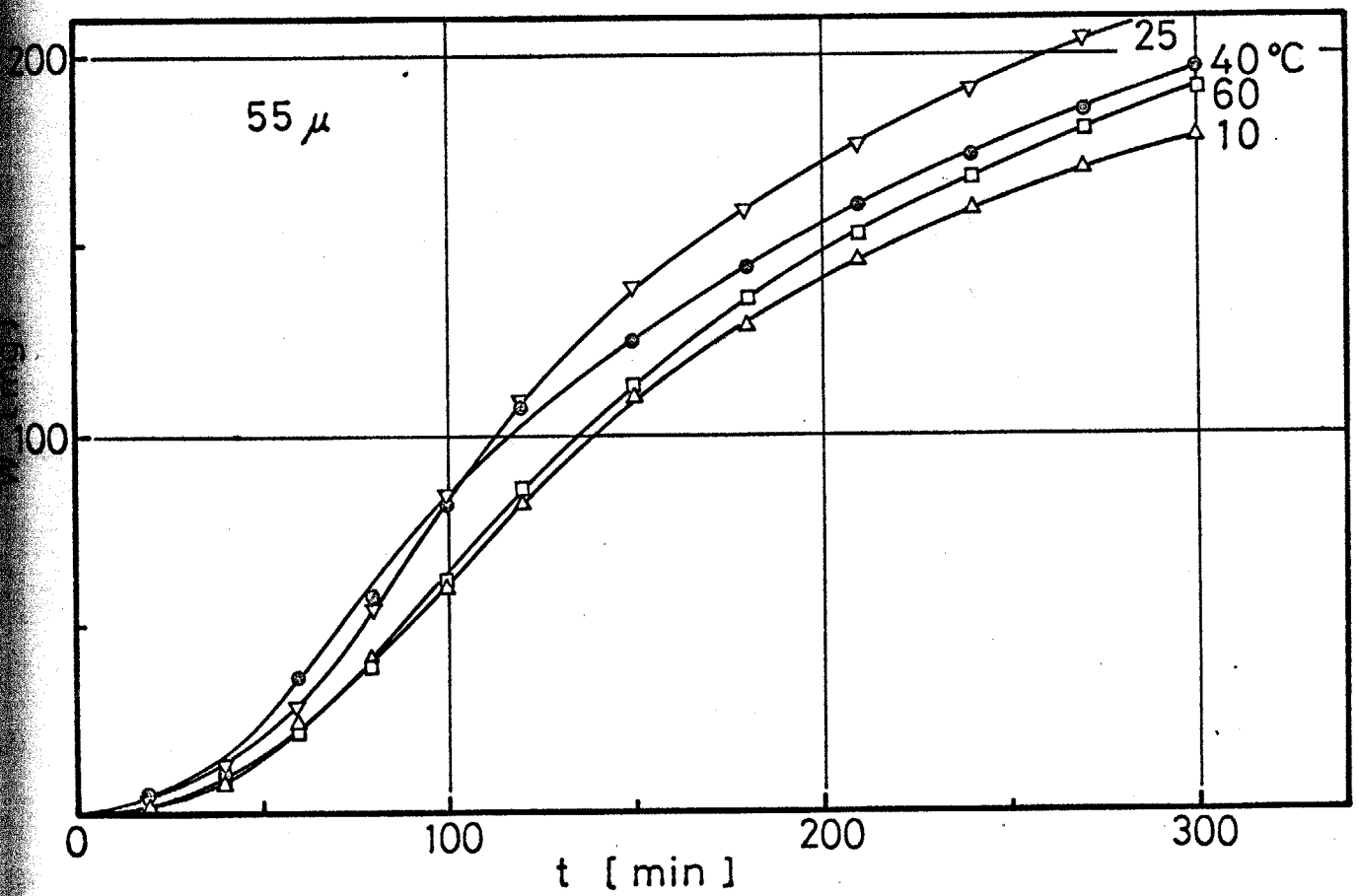
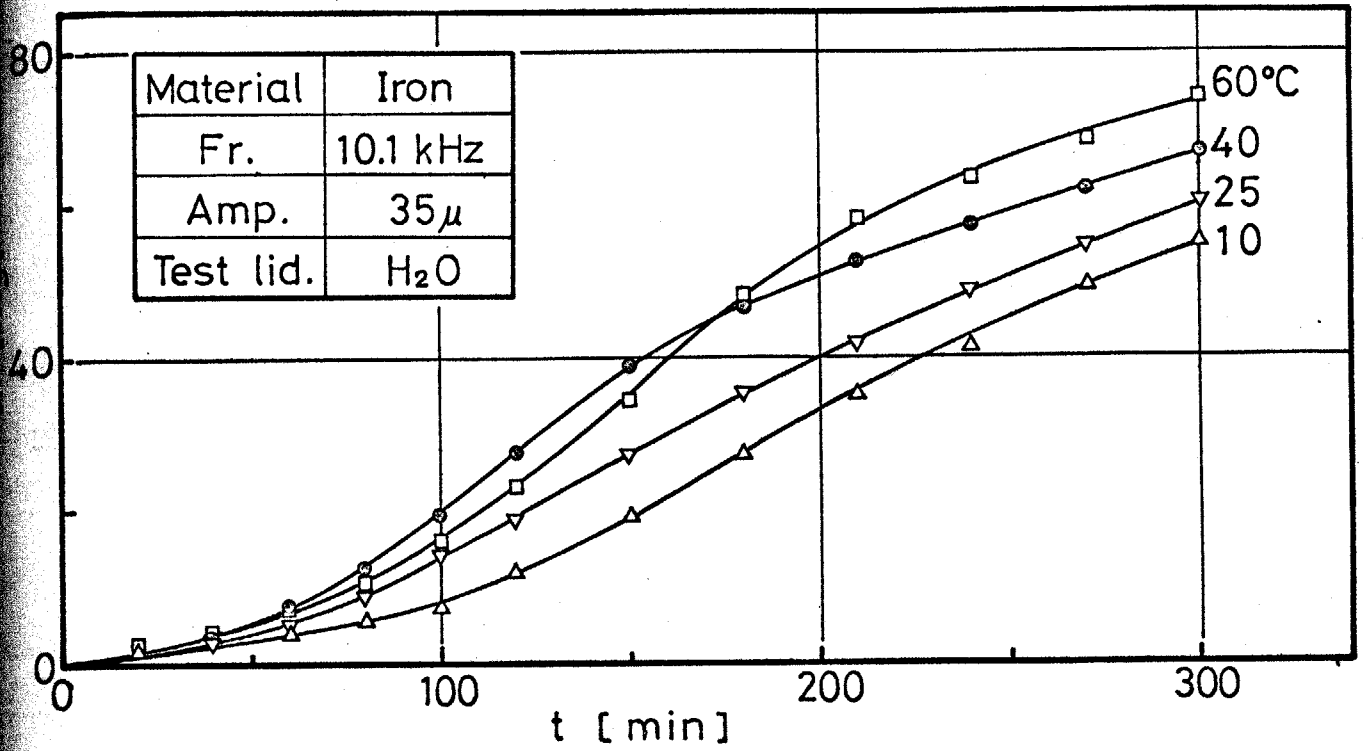


Fig. 4-1 Effect of temperature on W vs. t for iron

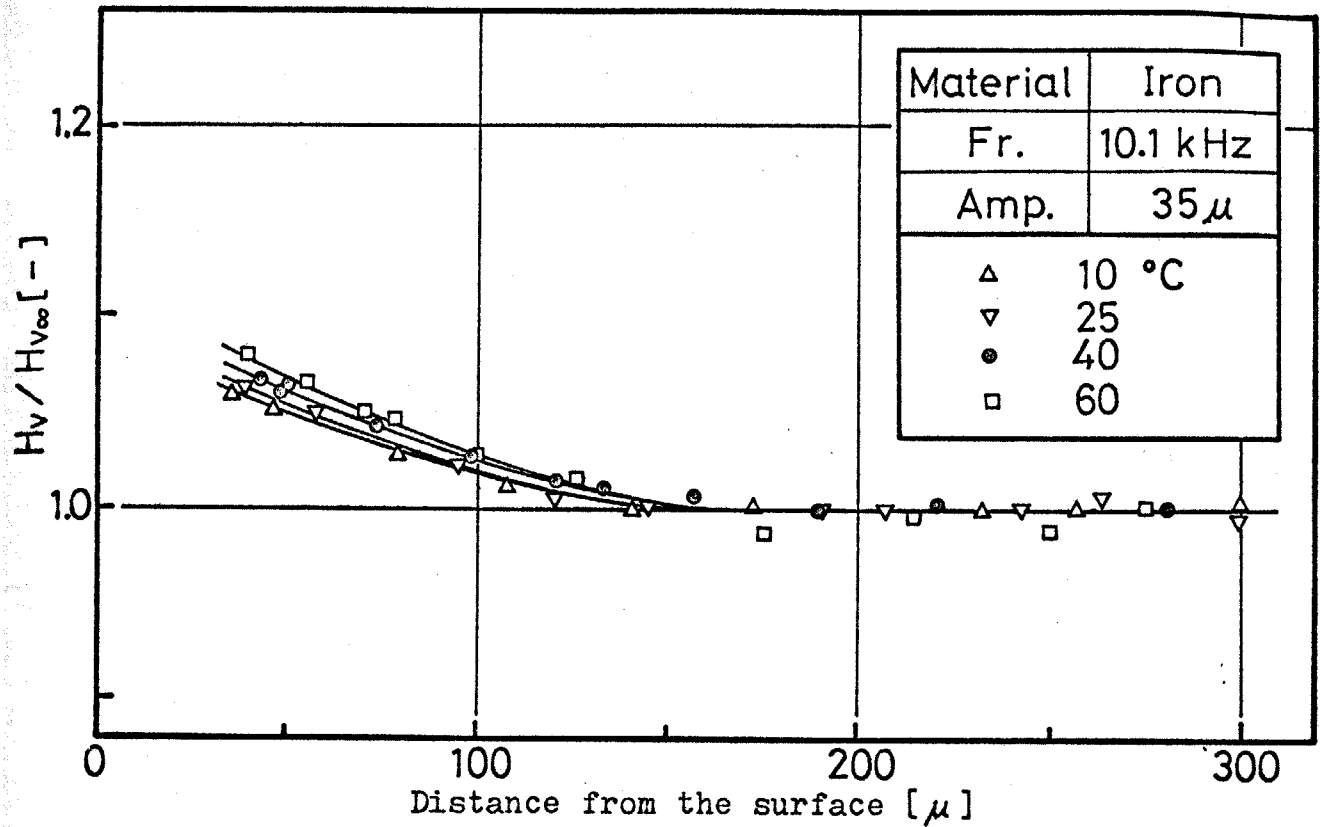


Fig. 4-2 Effect of temperature on $H_v/H_{v\infty}$ vs. Distance from the surface for iron

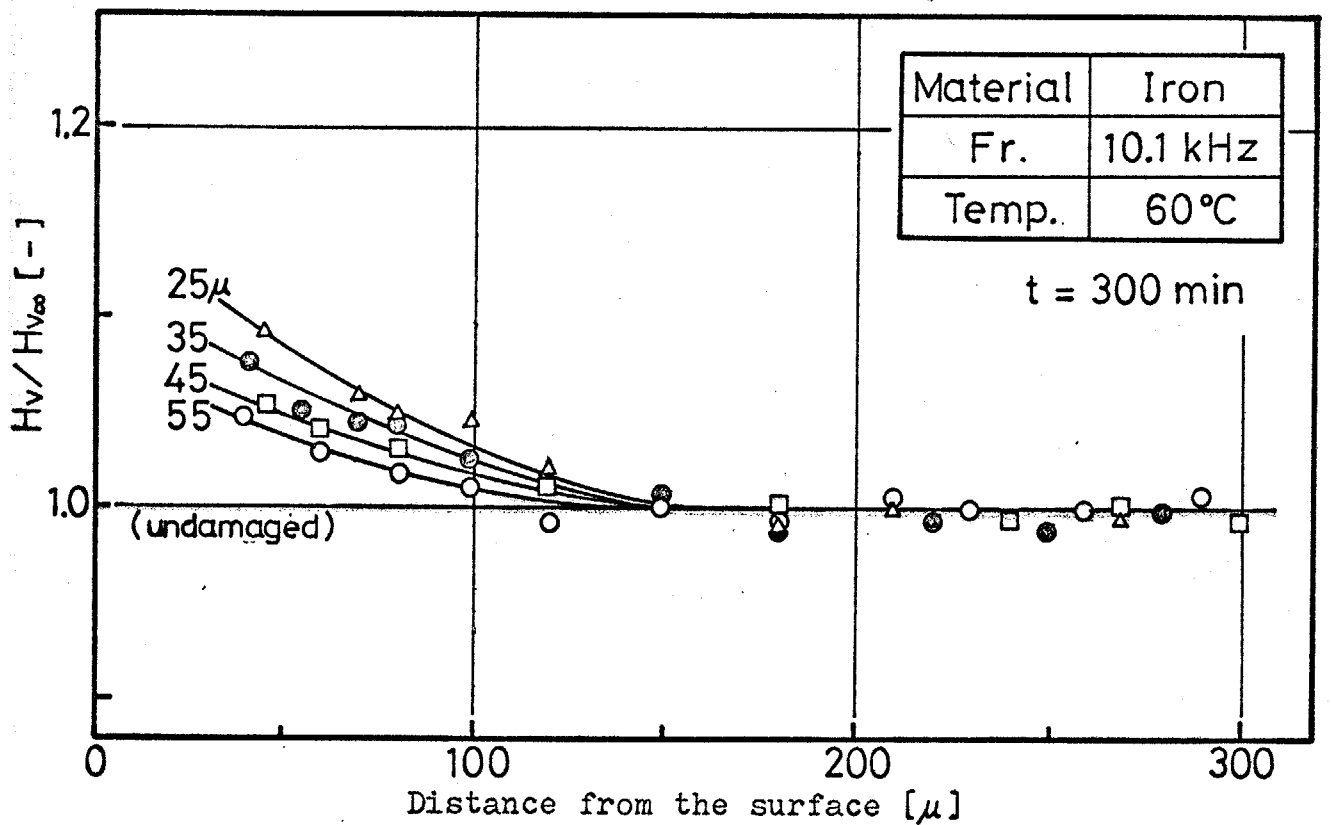


Fig. 4-3 Effect of amplitude on $H_v/H_{v\infty}$ vs. Distance from the surface for iron

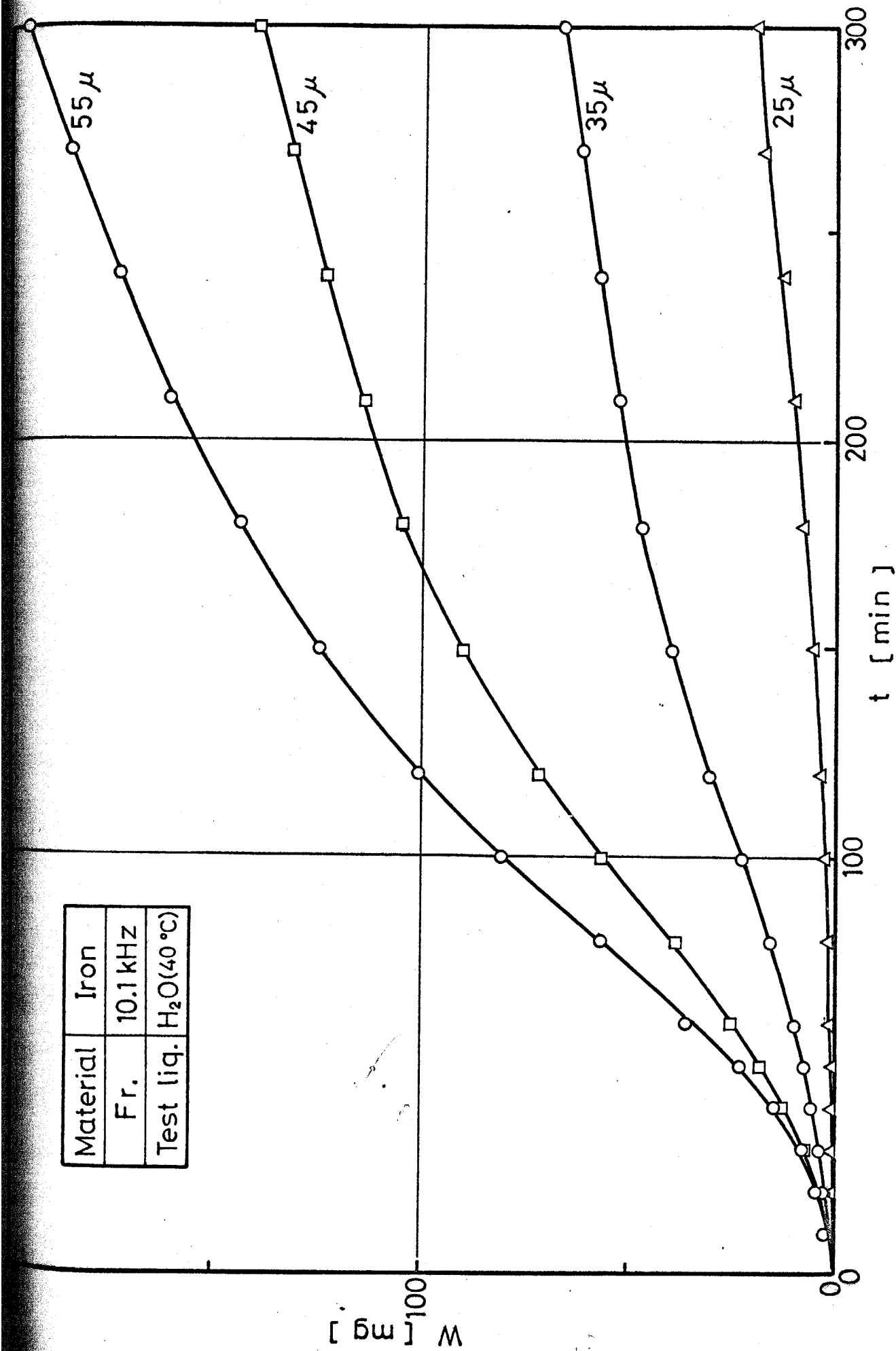


Fig. 4-4 Effect of amplitude on W vs. t for iron(10.1 kHz)

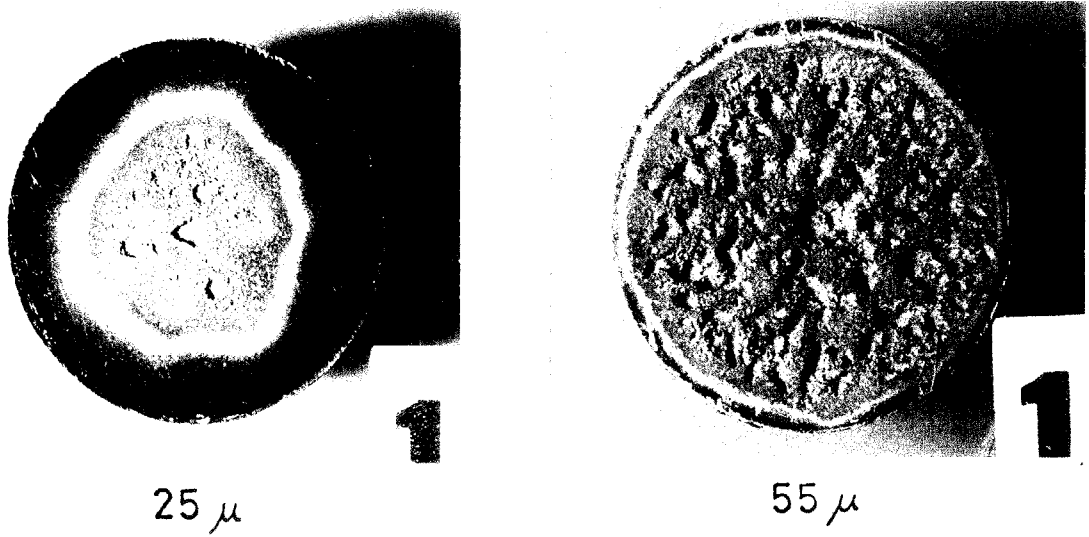


Fig. 4-5 Effect of amplitude on damaged pattern for iron

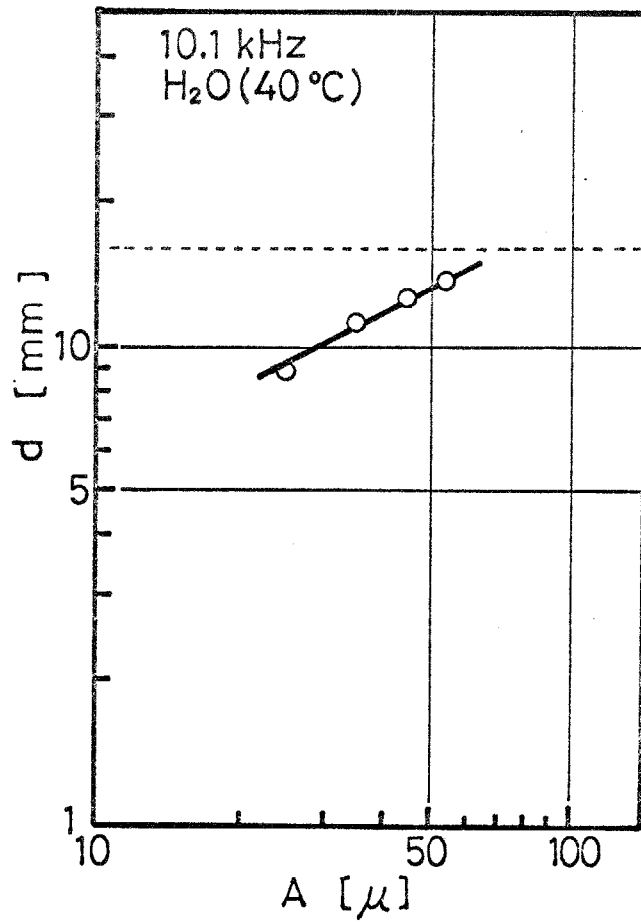


Fig. 4-6 Effect of amplitude of diameter on damaged area

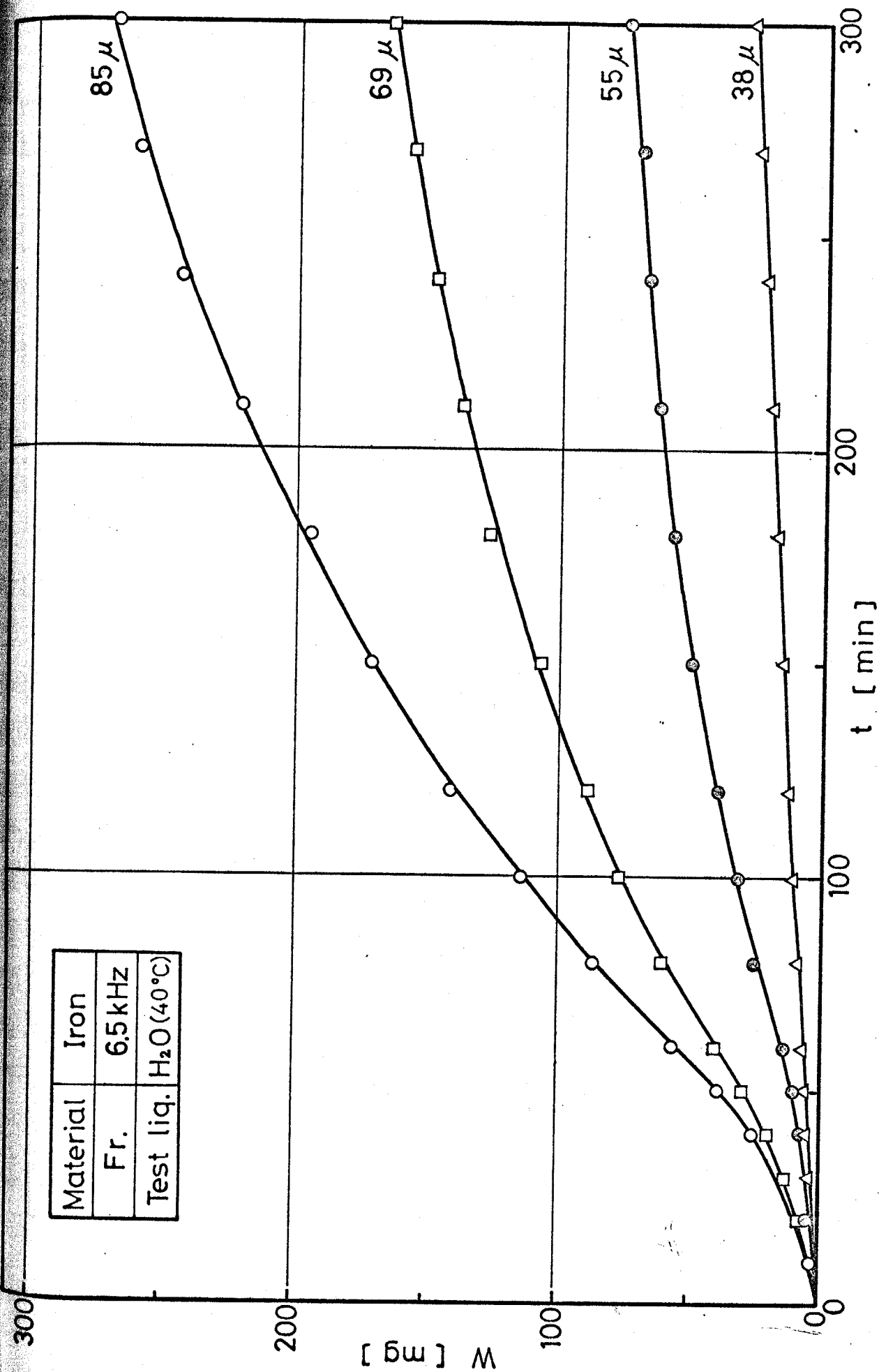


FIG. 4-7 W vs. t in 6.5 kHz

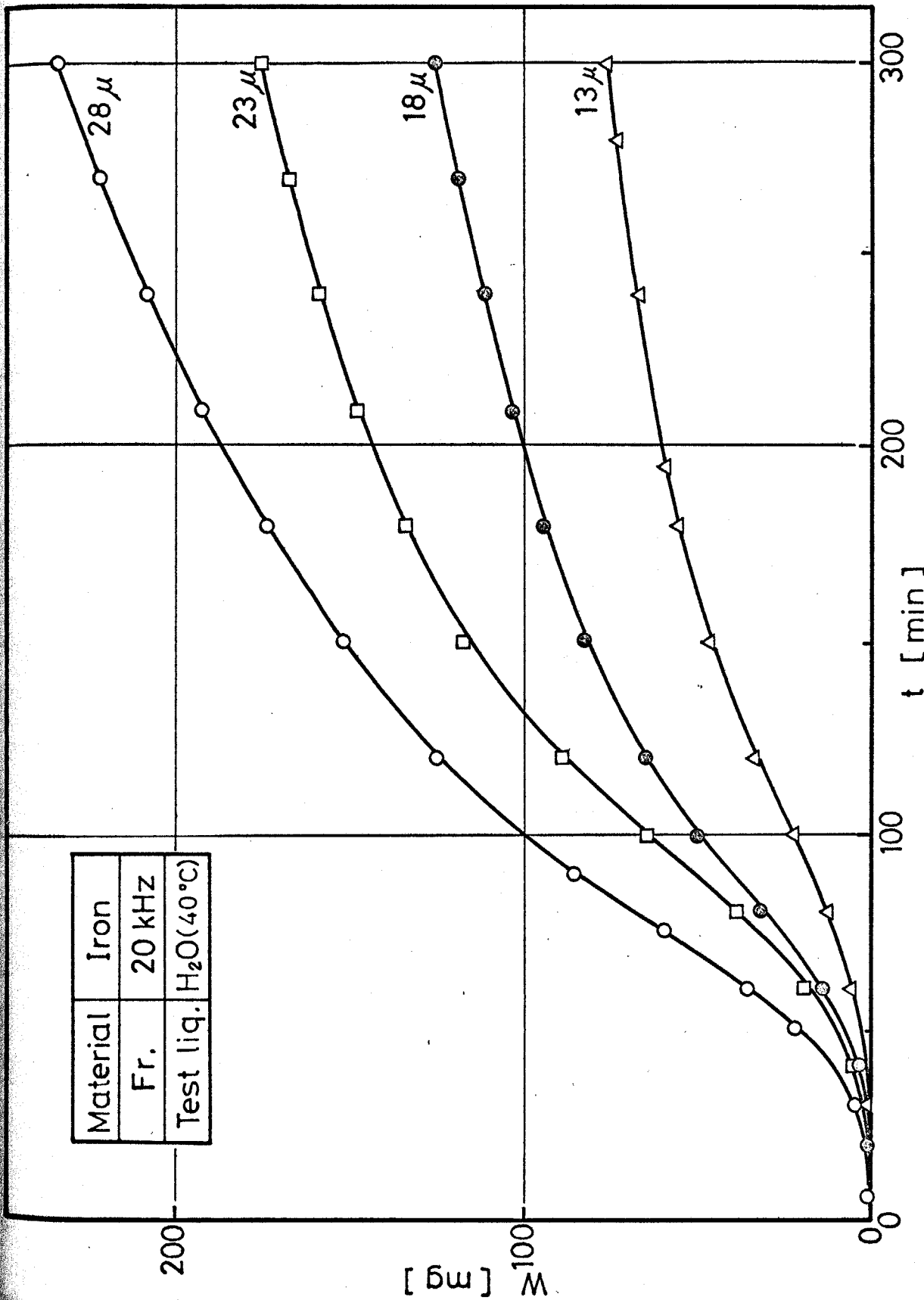


Fig. 4-8 W vs. t in 20 kHz

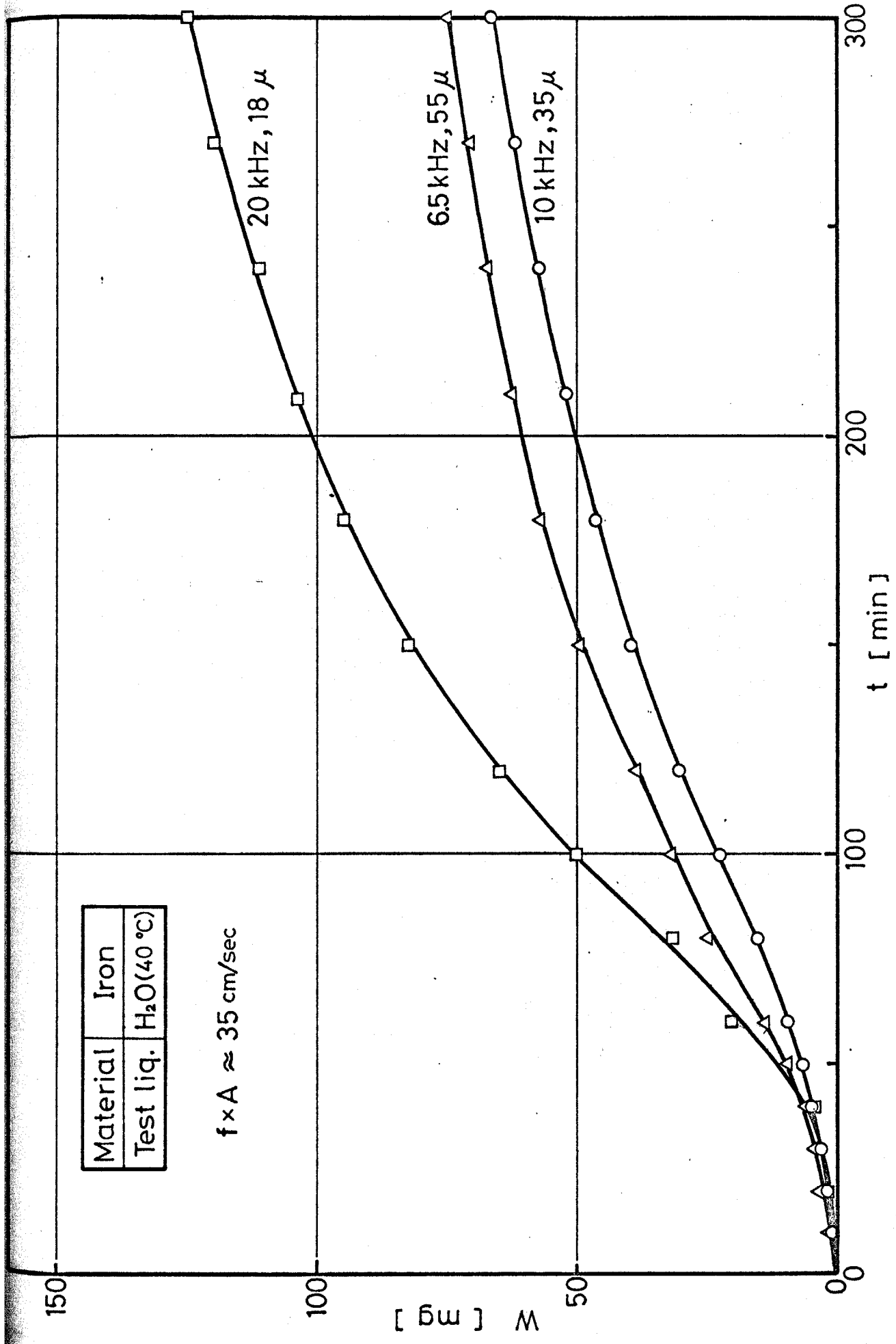
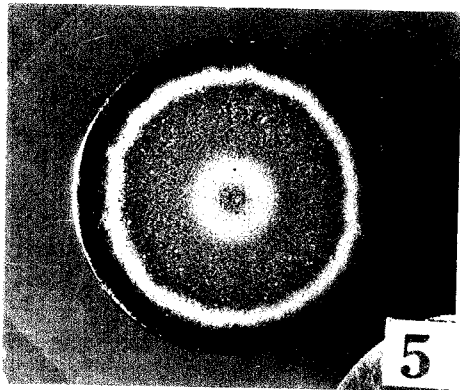
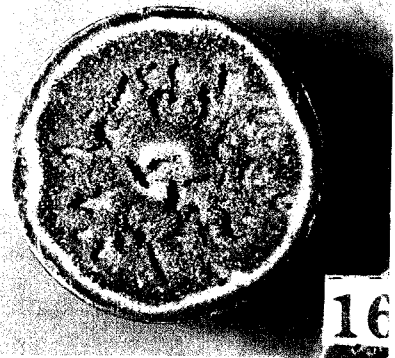


Fig. 4-9 W vs. t in three frequency ($f \times A = 35 \text{ cm/sec}$)

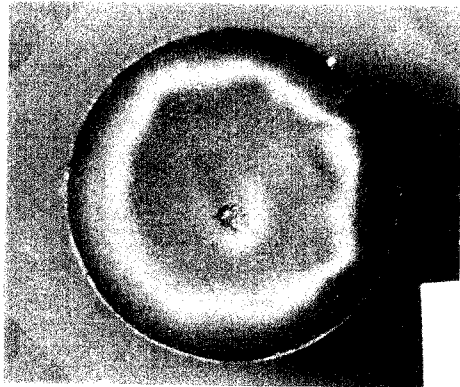


(40 min)

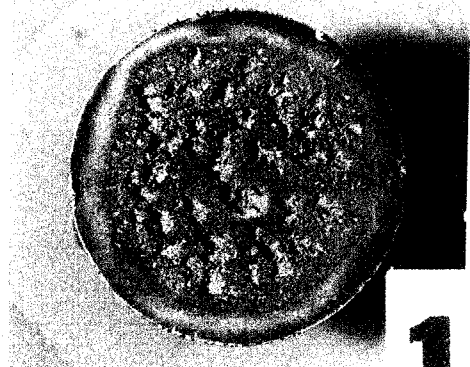


(300 min)

6.5 kHz, 69 μ

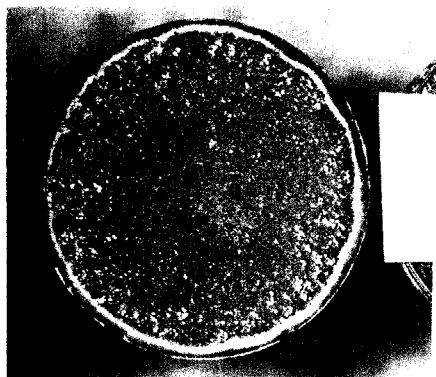


(40 min)

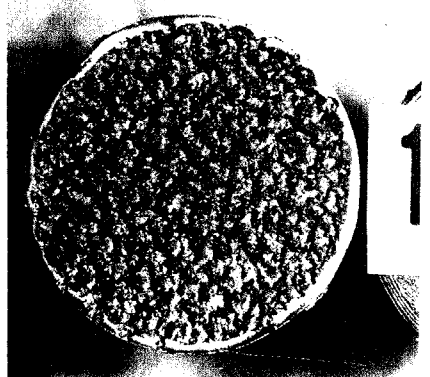


(300 min)

10 kHz, 45 μ



(40 min)



(300 min)

20 kHz, 23 μ

Fig. 4-10 Effect of frequency on the damaged pattern of test specimen

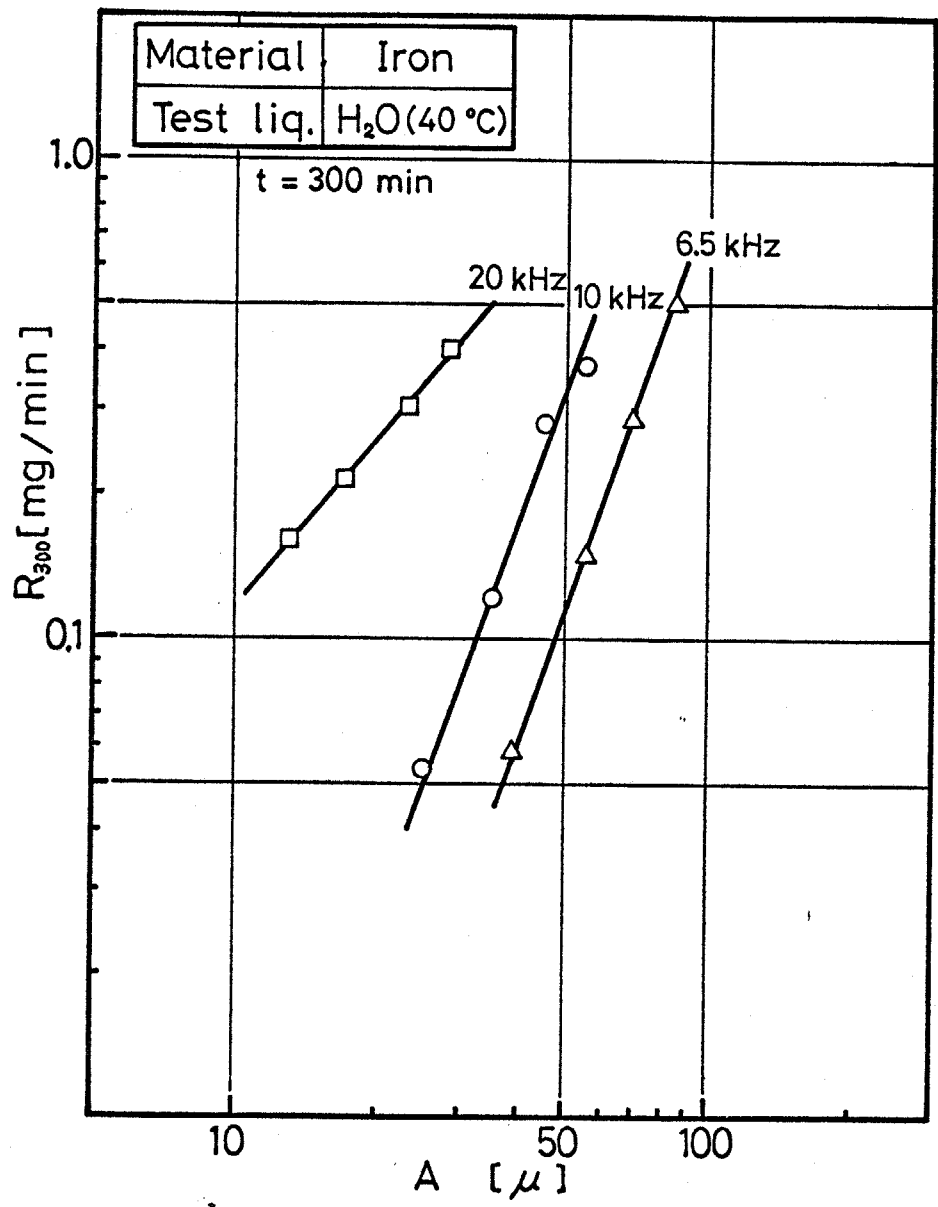


Fig. 4-11 Effect of frequency on the erosion rate at t=300 min vs. amplitude

第5章 損傷に及ぼすコロージョンの影響

5.1 緒言

前章までは、試験液として純水を用い、一応コロージョンは無視し得るとして検討してきた。しかし、第1章の緒言でも述べたように、実際の装置においては、キャビテーション・エロージョンが単独で発生する場合はむしろ少なく、コロージョン環境下で生じている場合がほとんどである。さらに、この環境下では、各々が単独で生じている場合に比べ、損傷は一層激しいと言われている。

そこで、本章では、コロージョン環境下におけるキャビテーション損傷と採り上げ、とくに損傷に及ぼすpHの影響に注目し、エロージョンとコロージョンの相互作用について考察する。

5.2 実験装置および方法

キャビテーションについての実験装置および方法は、前章までのものと同じである。ただし、試験液としては、希塩酸溶液を、また一部硫酸溶液、過塩素酸溶液を空気飽和して用い、いずれも pH を 1~4 に変化させた。

5.2.3 節で、純コロージョンの挙動を検討するために回転棒による腐食試験を行なったが、これには、Fig. 5-10 に示すようないわゆる回転棒腐食試験装置⁶⁵⁾を使用した。試験片は $19^{\circ} \times 35$ の円柱状の丸棒でその回転数は Re にして 10,000 および 20,000 で実験を行なった。

5.3 実験結果および考察

5.3.1 損傷に及ぼすコロージョンの影響

希塩酸溶液中での鉄のキャビテーション損傷実験の結果から、振幅 45μ の場合を例にとり、その $W-t$ 線図を示すと Fig. 5-1 が得られる。純水の場合に比べ、腐食環境中では損傷量が非常に大きくなっている。この図を微分して得られる $R-t$ 線図も Fig. 5-2 に示すが、これを見るといずれの pH においても、第 3 章で述べた純水における場合と同様、損傷速度 R は時間の経過とともに (増加 \rightarrow 減少 \rightarrow 定常) と変化する。ことに、

この R の経時変化と、試験片表面の損傷状態との関係も純水における場合 (Fig. 3-4) と同様であることが認められた。このように、コロージョン環境下でも、純水において得られた場合と同様、損傷速度 R の経時変化は試験片表面の損傷状態と密接な関係があることを示している。

i) $t=300 \text{ min}$ における損傷量の比較

キャビテーション損傷に及ぼす pH の影響を明確にするために、300 分後における損傷量と pH との関係も Fig. 5-3 に示す。損傷量 W は、pH 4 では純水 (pH 5.6) の場合と大差ないが、pH が 4 から 3 に減少するにつれ、急激に増加し、さらに pH が 2, 1 と小さくなると、わずかながら逆には減少する傾向にある。この pH に関する挙動のうち、pH 4 から 3 にかけての損傷量の急激な増加は、Whitman⁶⁾ の報告をなわら、希塩酸溶液中での銅の腐食速度は pH 4 程度から急激に増加するという実験結果とも一致している。この点については、次節でくわしく検討する。

つぎに、Fig. 5-4 に損傷速度 R に及ぼす振幅の影響を示す。縦軸の値は、損傷速度が一応定常期に達したと考えられる $t=300 \text{ min}$ における値である。この R の pH においてもほぼ直線を示し、その勾配は腐食環境において小さくなっている。すなわち、腐食環境下では R に及ぼす振幅の影響は減少することを示している。

ii) 各期間における比較

以上は、 $t=300 \text{ min}$ における検討であるが、損傷に及ぼすコロージョンの影響をさらに明確にするには、時間の経過とともに、その影響の状態がどのように変化するか、あるいは表面状態の変化とどのような関係があるかを検討する必要がある。そこで、3.2.2節で明らかにした①②③④の各期間毎にコロージョンの影響を検討してみる。

いま Fig. 3-4 に示すように t_a, t_{ab}, t_c を定義し、それぞれ期間に対応する損傷量 W_a, W_{ab}, W_c を求め^{*}、 W/t で各期間の平均損傷速度を定義し、pH に対してプロットすると Fig. 5-5 のようになる。この図において純水の場合を基準として各 pH での値との比をとったのが、つぎの Fig. 5-6 である。これを見ると、③期間と比較し①②期間において、よりコロージョンの影響が大きいのがわかる。そこで、この期間におけるコロージョンの効果と明らかにするために、試験片表面について走査型電子顕微鏡による観察を行なった。Fig. 5-7 の写真はその結果を示したものである。純水と pH3 における10分後の損傷面であるが、いずれの場合も小さなピットを生じている。しかし、その数は圧倒的に pH3 における場合の方が多い。このように、コロージョンと

*①期間は、時間が短く、損傷量 W_a も小さいため、バラツキが大となるので、ここでは省略する。

同時に生じている場合には、コロージョンにより多数の小さなピットを生じ、そのため損傷はより脆性なものになり、かつ損傷量も大きくなる。Fig. 5-8 に損傷断面の硬度分布を示すが、pH が小さくなるにつれ硬度上昇の割合は低く、明らかに純水における場合に比してより脆性的な機構で損傷を生じているのがわかる。このことは、さらに Fig. 5-9 の損傷断面の金属顕微鏡による写真を見ると、コロージョンの無視できる系（純水）における場合に比べて、コロージョンのある系（pH 3）では、非常に鋭ククラックが多数認められることから明らかである。

5.3.2 コロージョンとエロージョンの相互作用

前節で、Fig. 5-3 の pH 4 → 3 に見られる損傷量 W の急激な増加は、コロージョンの急激な増加に対応すると予想したが、この点を確かめるために、回転棒腐食試験装置 (Fig. 5-10) を用い、コロージョンの挙動を検討してみた。Fig. 5-11 にその結果を示すが、予想通り純コロージョンの場合も、pH 4 → 3 で急激な増加が見られ、さらに pH 2 → 1 でわずかに減少する傾向が認められる。このように、コロージョンとエロージョンを同時に生じている場合 (Fig. 5-3) と、純コロージョンの場合 (Fig. 5-11) では、損傷の pH に対する挙動が非常に類似し

ているのがわかる。このことから、コロージョンとエロージョンが同時に生じている場合、コロージョンの影響がかなり大きいものと思われる。

1) 純コロージョンの pH 挙動

純コロージョンが pH に対して Fig. 5-11 のような挙動を示す原因について検討してみる。

a) pH 4 からの挙動

pH 4 からの挙動は、よく知られているように、⁶⁷⁾ 腐食生成物の膜の有無によるものと考えられる。すなわち、試験後の試験片表面を観察すると、pH 4 以上では、試験片全面が一様に褐色の腐食生成物で覆われているが、pH が 3.5 になると Fig. 5-12 に示すように部分的に褐色の生成物膜が破れ、地金と思われる部分が露出してくる。さらに pH が 3 以下になると、もはや褐色の生成物膜は認められない。pH が 3.5 以上で見られた褐色の腐食生成物は、X線回析の結果 Fe_3O_4 のパターンが認められたが、試料作成時に空气中で乾燥することにより $\text{Fe}(\text{OH})_3 + \text{Fe}(\text{OH})_2 \rightarrow \text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4$ なる反応が起ること、また鉄の中性溶液中における腐食機構⁶⁷⁾ から考えて、 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ であると思われる。したがって、Fig. 5-11 において、pH 4, 5 で腐食量が小さいのは、試験片表面全体が $\text{Fe}(\text{OH})_3$ で覆われ、これが保護膜として作用するためである。また pH が 4 からの

急激に腐食量が増加するのは、pHの減少につれて $\text{Fe}(\text{OH})_3$ の溶解度が増すために、 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 膜の比較的薄い部分からしだいに破れ、直接液に接する地金の部分が増すためである。

b) pH 3 から 1 の挙動

つぎに、pH 3 から 1 における挙動については、従来この程度の強酸域での報告は少なく、それらはいずれも分極曲線に関する考察に重点を置いたもの^{68), 69), 70)}がほとんどであり、pHの減少につれて腐食量が減少する原因については、まだ明らかにされていない。

pH 3 から 1 において HCl 溶液中ではしだいに腐食量が減少する傾向を示したが、他の酸においても、はたしてこれと同様の現象が見られるかどうかを検討してみると Fig. 5-13 に示すように H_2SO_4 , HClO_4 では、HCl の場合と異なり腐食量は pH の減少につれて増加する。このように酸の種類により腐食量の pH に対する挙動が異なるのはアニオンの違いによるためと考えられる。

さて、腐食量減少の理由として pH 3 以上で見られた腐食生成物の膜の他に考えられるのは吸着である。すなわち、アニオンが鉄表面に吸着し、活性部を覆い、そのため腐食速度を減少させる結果となる。この観点からすると、Fig. 5-13 に見られた酸の違いによる pH 挙動の差は、アニオンの吸着能の差によることになる。事実、一般的にこれらアニオンに関しては $\text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{ClO}_4^-$ の順に吸着能が低くなり、とくに ClO_4^- ではほと

んど0と見出し得ることが知られている。^{71)~75)} さらにこの点を確かめるために、pH 3のHCl溶液へ種々のアニオン(0.1 mol/l)を添加し、腐食速度への影響を検討してみた。Fig. 5-14にその結果を示す。縦軸は、アニオンを添加した場合の腐食速度(%)と無添加の場合のそれ(%)との比で、横軸はアニオンの吸着率である。この吸着率としては、白金上への吸着に対するChiu's⁷²⁾の結果も引用した。明らかに吸着率が増すにつれ、腐食速度が減少する傾向にある。以上の結果から、pHが3から1で見られる腐食速度の減少は、 Cl^- の吸着のためと考えられるが、実際に鉄の場合にも Cl^- が吸着されているかどうかを明らかにする必要がある。

Cl^- の吸着に関しては、電気二重層容量^{76), 77)}、エリブソメトリ-^{72), 73)}、トレーサー法^{71), 78), 79)}、反応電流抑制法⁷⁴⁾、などの方法により検討されているが、いずれも定量的取扱いが困難であるとか、装置あるいは操作が複雑であるとかの欠点がある。そこで、本論文では Cl^- の分析で最も一般的な吸光光度法を採用し、 Cl^- の吸着測定を行なった。なおその発色は、JIS K 0101のチオシアン酸第二水銀法によった。⁸⁰⁾

試験片は14φ×40の回転棒で、まずこれをHCl中へ浸漬して Cl^- を吸着させ、一定時間後に取り出して、純水で表面を十分洗い、つぎに1N-H₂SO₄へつけてカソード分極し、吸着している Cl^- を脱着させる。この脱着した

Cl^- (すなわち H_2SO_4 中の Cl^-) をさきの吸光光度法により分析する。

この実験結果を Fig. 5-15, Fig. 5-16 に示す。Fig. 5-15 は, HCl への浸漬時間と Cl^- 吸着量との関係を示す。また Fig. 5-16 に pH との関係を示すが pH が小さくなるにつれ吸着量が増しており, 吸着が腐食速度に何らかの影響を与えていることは明らかである。そこでつきに両者の間にどのような関係があるかを検討するが, それには, 吸着が 0 の状態における腐食速度(v_0)を知る必要がある。そのために, ここでは一応先述した HClO_4 における腐食速度を v_0 と仮定して検討する。Fig. 5-17 に HClO_4 と HCl における腐食量と pH の関係を示すが, 今まで述べたように, 吸着を無視し得る場合は HClO_4 の曲線に示される腐食量を示したものが, Cl^- の吸着により HCl の曲線まで減少するわけで, その減少率, すなわち $(F_{\text{HClO}_4} - F_{\text{HCl}}) / F_{\text{HClO}_4}$ を求め, 吸着量 (Fig. 5-16) に対してプロットすると Fig. 5-18 が得られる。Re, pH の如何にかかわらず一本の直線で示されることから, 腐食量の減少は吸着に依存すると結論できる。また, この直線がほぼ原点を通ることから, さきに仮定したように HClO_4 においては吸着をほとんど 0 と見なし得ると言える。

この Fig. 5-18 についてさらに検討してみる。いま, HCl における腐食速度 v_0 が

$$\tau = \theta \tau_{ad} + (1-\theta)\tau_0 \quad (5-1)$$

で表わせると仮定する。

ここで

(τ : HCl 中での腐食速度
	τ_{ad} : Cl^- の吸着部における腐食速度
	τ_0 : Cl^- の吸着が閉じしみの腐食速度 (HClO ₄ 中)
)	θ : Cl^- の吸着率

(5-1) 式を変形すると

$$\frac{\tau_0 - \tau}{\tau_0} = \frac{\tau_0 - \{\theta \tau_{ad} + (1-\theta)\tau_0\}}{\tau_0} = \theta \left(1 - \frac{\tau_{ad}}{\tau_0}\right) \quad (5-2)$$

となり、この左辺は Fig. 5-18 の縦軸に相当する。したがって τ_{ad}/τ_0 が pH にかかわらず一定であれば $(\tau_0 - \tau)/\tau_0$ は θ に比例する結果となり Fig. 5-18 の結果は理論的にも裏付けられることになる。この点を確かめたのが Fig. 5-19 である。HClO₄ に NaCl を漸次添加し、腐食速度の変化と NaCl 添加量に対しプロットしたものである。NaCl が十分大になると τ/τ_0 の値は pH 如何にかかわらずほぼ一定値に近づく。すなわち、NaCl の添加量が大の場合の腐食速度 τ は τ_{ad} にほぼ等しいと見なし得るから、 τ_{ad}/τ_0 は pH に依存せず、ほぼ一定値を持つと言えよう。

以上の結果から、総コロージョンに見られた pH 3 から 1 での腐食量の減少は (Fig. 5-11), Cl^- の吸着が増すため、減少の割合は吸着量に依存すると結論できる。

コロージョンとエロージョンが同時に生じている場合の pH 挙動 (Fig. 5-3) も、純コロージョンの場合と同様の説明ができよう。すなわち、pH3 では Cl^- の吸着は少なく、その影響はほとんどないが、pH1 程度になると、 Cl^- の吸着も多くなりまたその吸着が堅固なために、振動下においても脱着を示さず、コロージョンの効果が減少することになる。

ii) 設計の見地からの検討

さて、つぎにコロージョンとエロージョンの相互作用について設計の見地からの検討を行なう。

いま、コロージョンとエロージョンを同時に生じている場合の損傷量 W が、便宜的に

$$W = W_c + W_{ce} + W_e \quad (5-3)$$

で表わされると仮定する。ここで W_c は純コロージョン量、 W_e は純エロージョン量、 W_{ce} は見かけの両者の相互作用による損傷量である。 W_e としては純水における損傷量を採用した。これは Fig. 5-20 に見られるように陰極防食を行ない外部電流を増して行くと、損傷量はしだいに減少するが電流がある値以上ではほぼ一定となり、この時の値は純水におけるそれと一致する。すなわち、純水においてはコロージョンは無視でき、純エロージョンによる損傷と見なせるためである。

また W_c としては、エロージョンを生じている場合の純コロージョンを定測することが不可能なため、便宜上 Fig. 5-11 を使用したが、その値は W_e , W_{ce} に比べて小さいため、定量的な取扱いには問題はないと考えられる。

実験データから W_c , W_{ce} , W_e を求め、それぞれ振幅に対してプロットすると Fig. 5-21 が得られる。これは pH3 の場合であるが、各 pH について W_{ce} を示すと Fig. 5-22 のようになる。これはいずれも飽和曲線の型を示しており、

$$W_{ce} = a [1 - \exp\{-b(A - A_0)\}] \quad (5-4)$$

で表わされる。ここで A_0 はキャビテーションを生じる振幅の臨界値(閾値)で、装置および材料に個々の値である。いま $A_0 = 12\mu$ とし (Fig. 5-22 参照), a, b を求め (Table 5-1), pH に対してプロットすると Fig. 5-23 が得られ、 a は pH の関数、また b は pH に無関係に一定の材料定数であることがわかる。すなわち、 W_{ce} はコロージョンによる項 a とエロージョンによる項の積の形できいてくることを示している。つまり (5-3) 式は

$$\begin{aligned} W &= W_c + W_{ce} + W_e \\ &= f_1(\text{pH}) + f_2(\text{pH}) \cdot f_3(A) + f_4(A) \end{aligned} \quad (5-5)$$

となる。

以上は、HCl における結果で、 a は pH の関数であることと示したが、この Fig. 5-23 を見ると、さきの Fig. 5-11 (W_c vs. pH) に類似しているのがわかる。すなわち a は W_c と密接な関係があると予想される。そこで、 H_2SO_4 に対しても同様の実験から a を求め W_c についてプロットしてみると Fig. 5-24 が得られる。明らかに a は W_c に関係しているのがわかる。また b は W_e に関係する。したがって、(5-5) 式の W_c がよび W_e を知ることでより W_{ce} を求めることができる。すなわち、コロージョン環境下でのキャビテーション損傷量の推定が可能となる。Table 5-2 に、10kHz においてこのようにして求めた推定値と実験値との比較を示すが両者の間にはかなり良い一致が見られる。

5.4 結論

本章では、実際の装置・機械では、コロージョンとエロージョンを同時に生じている場合がほとんどであることから、コロージョン環境下でキャビテーション実験を行ない、エロージョンに及ぼすコロージョンの影響について検討し、下記の結論を得た。

- 1) エロージョンとコロージョンが同時に生じている場合は、エロージョンのみの場合に比して損傷はかなり大きくなる。これは、コロージョンにより材料

が劣化され、より脆性的な機構で損傷を生じるためである。

- 2) エロージョンとコロージョンを同時に生じている場合の pH の損傷量に及ぼす影響は、純コロージョンにおける場合と類似している。すなわち、pH 4 ~ 3 で急激に損傷を増し、pH が 3 ~ 2 で極大値をとり、さらに pH が小さくなると損傷は再び減少する傾向を示す。この原因について検討した結果、pH 4 から 3 の挙動は腐食生成物の有無により、pH 3 から 1 の挙動は Cl^- の吸着によることを明らかにした。
- 3) エロージョンとコロージョンの相互作用について設計的な見地から検討を行ない、設計に有用な式 (5-3), (5-4) 式を提出した。この式により、コロージョン挙動およびエロージョン挙動を知れば、コロージョン環境下でのキャビテーション損傷量を推定することが可能となった。

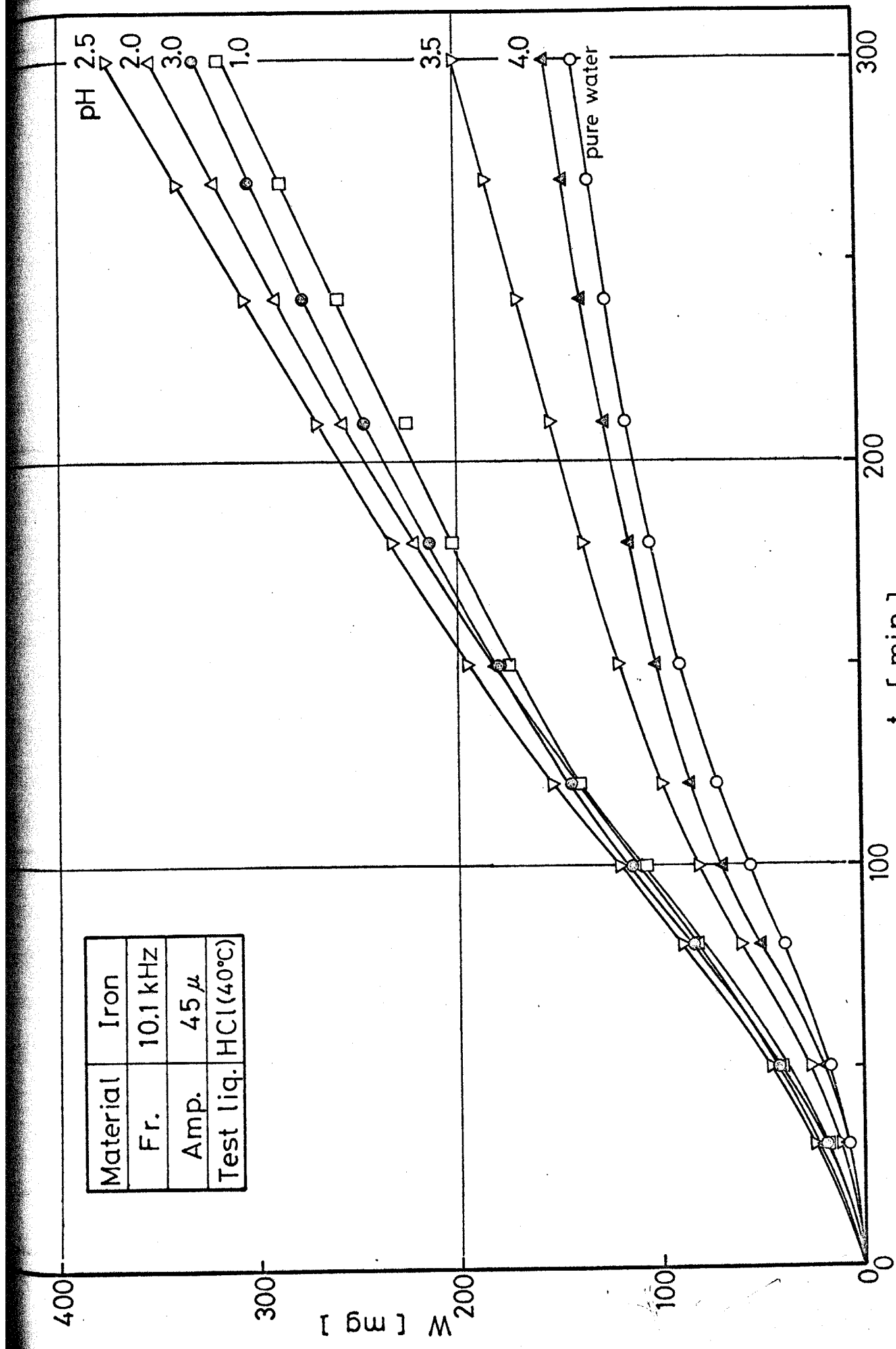


Fig. 5-1 Effect of pH on W vs. t for iron

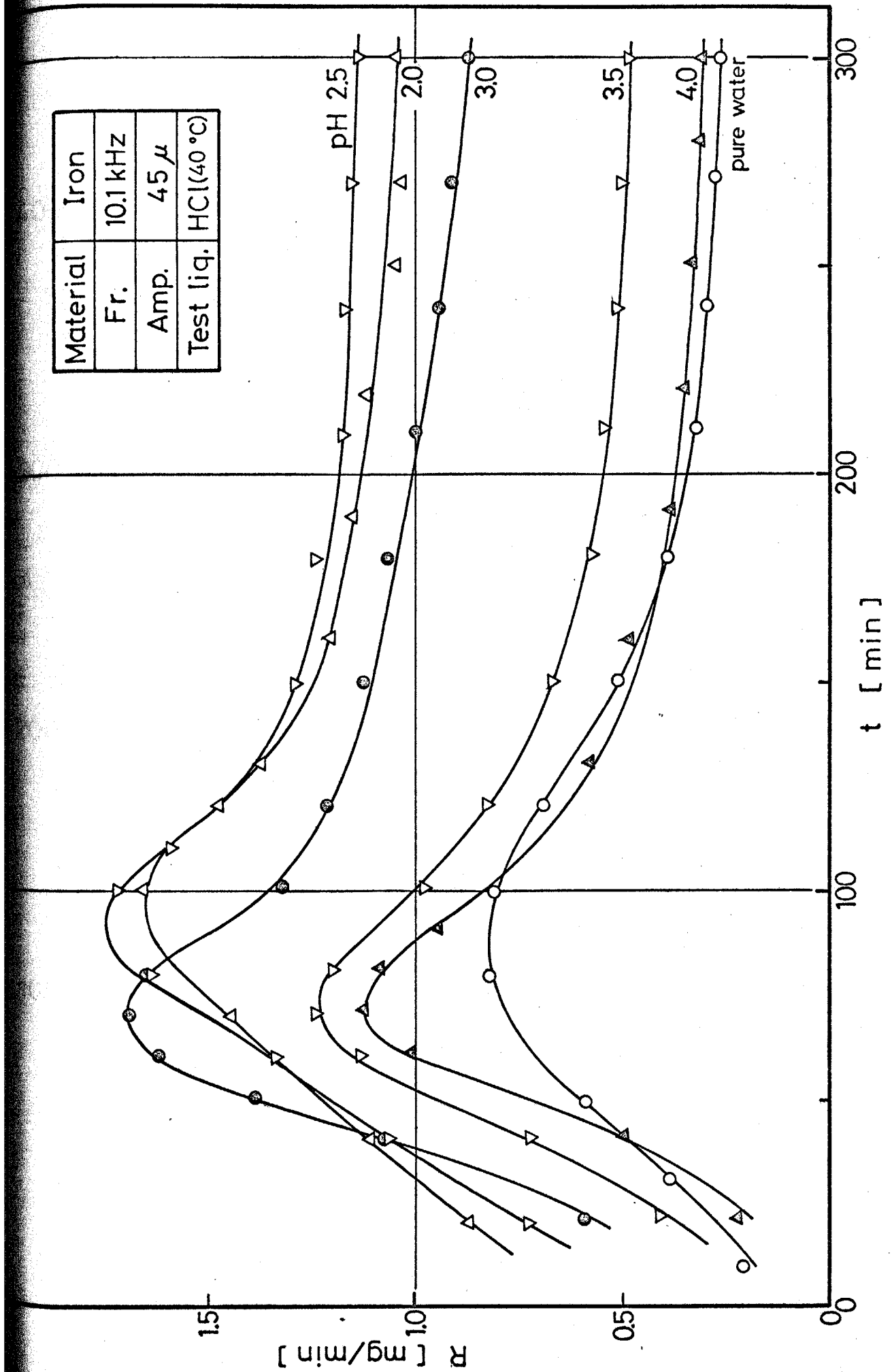


Fig. 5-2 Effect of pH on R vs. t for iron

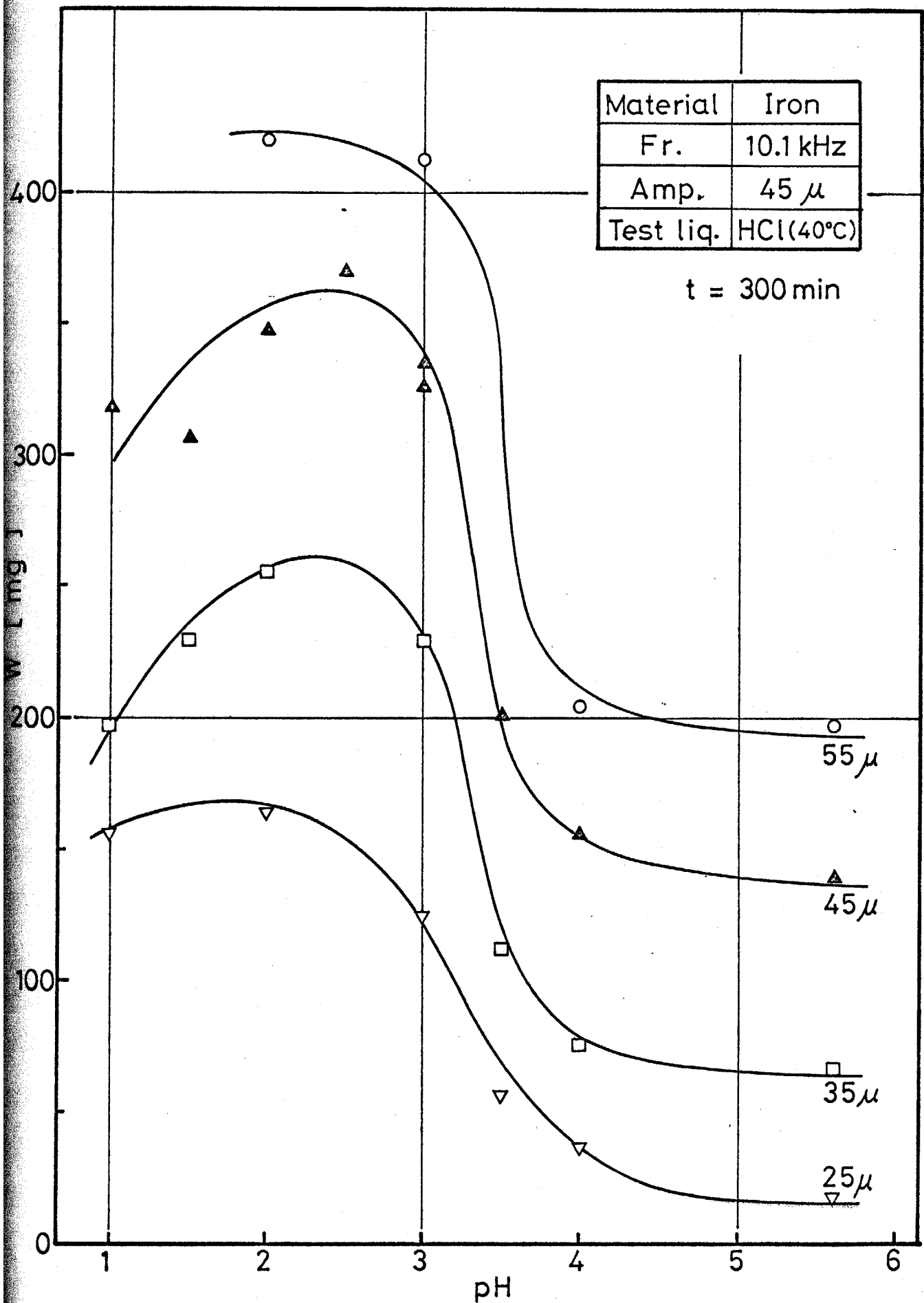


Fig. 5-3 Weight loss at $t=300$ min vs. pH
(magnetostrictive vibratory apparatus)

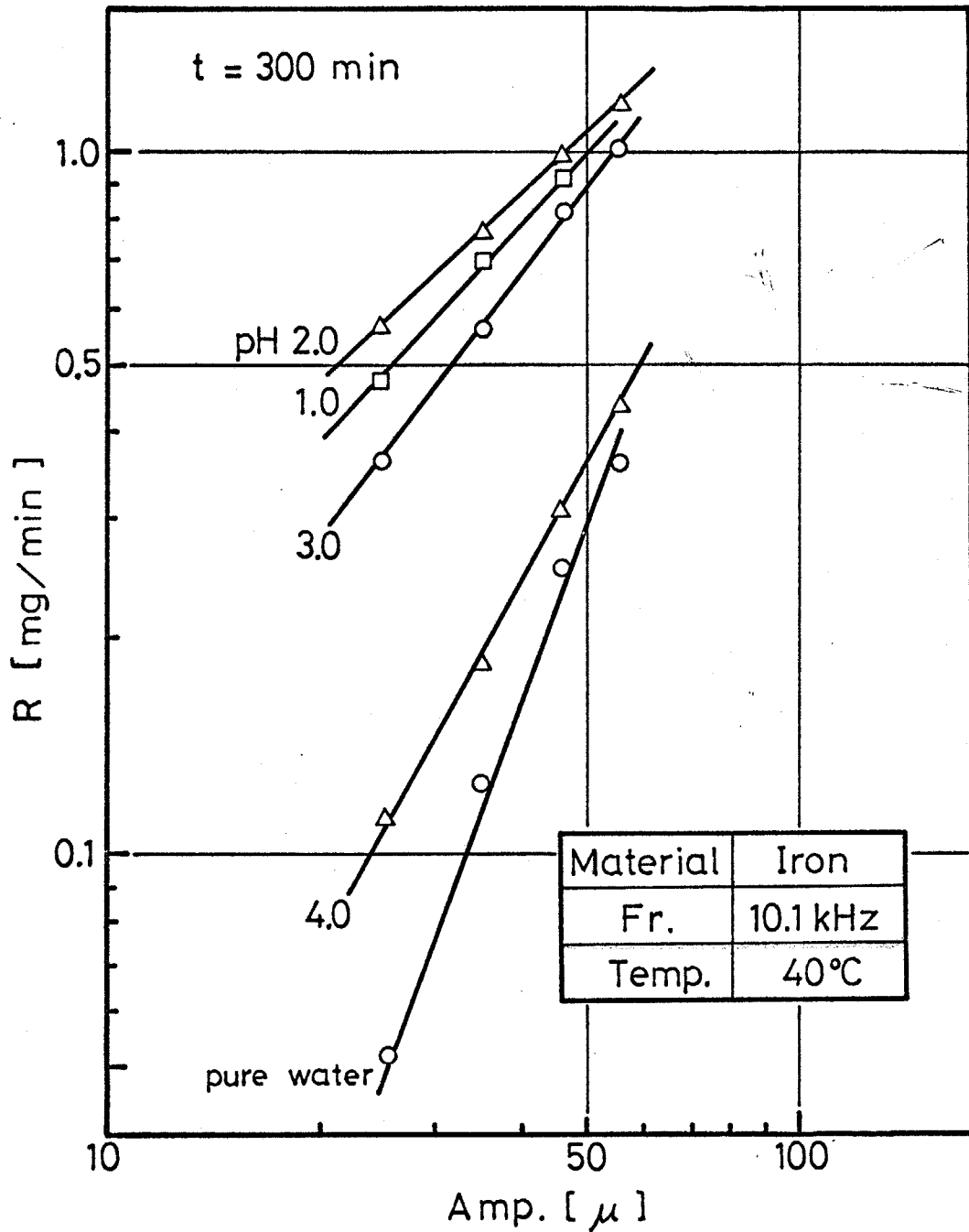


Fig. 5-4 Effect of pH on the erosion rate at $t=300 \text{ min}$ vs. amplitude for iron

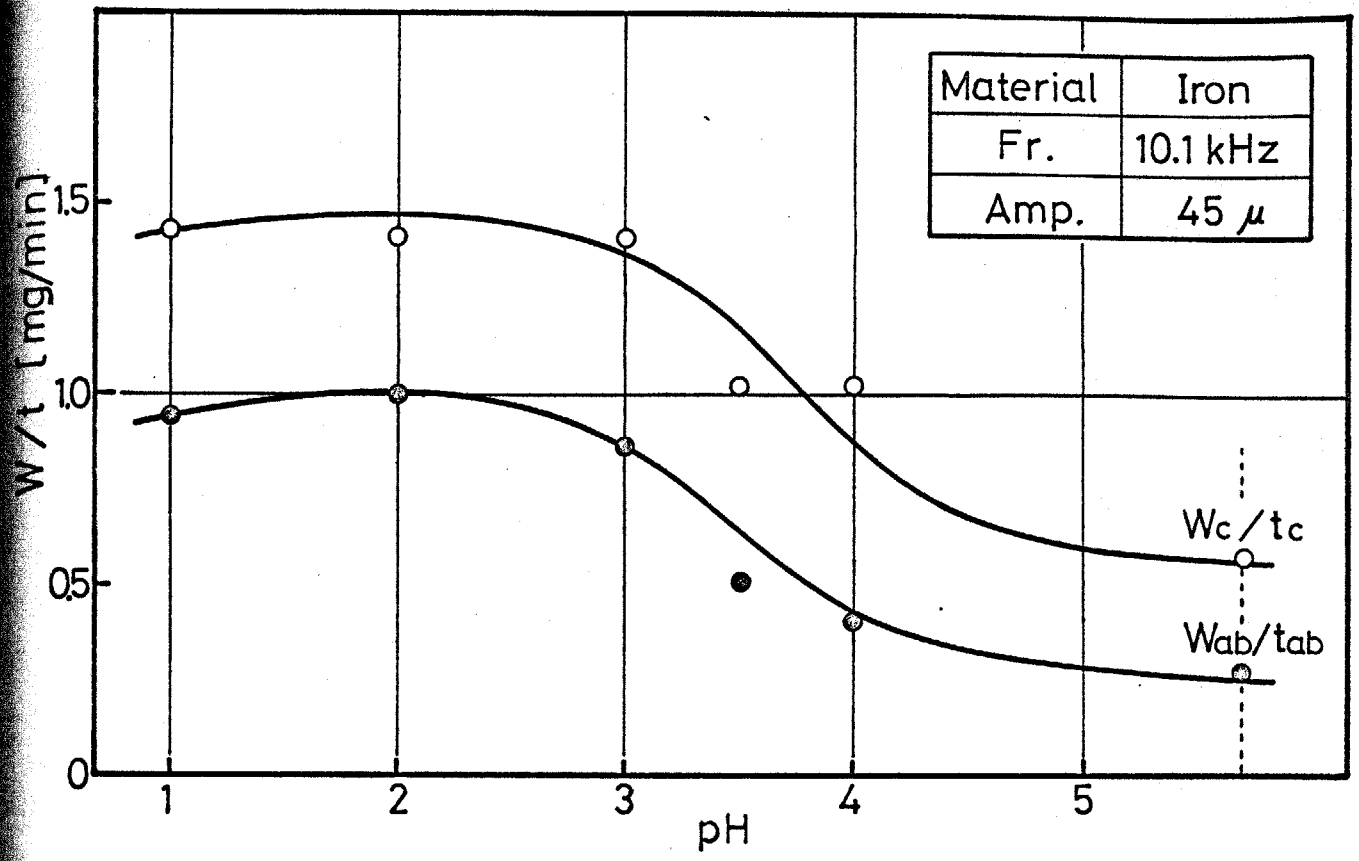


Fig. 5-5 Average erosion rate vs. pH in (a) and (c) period

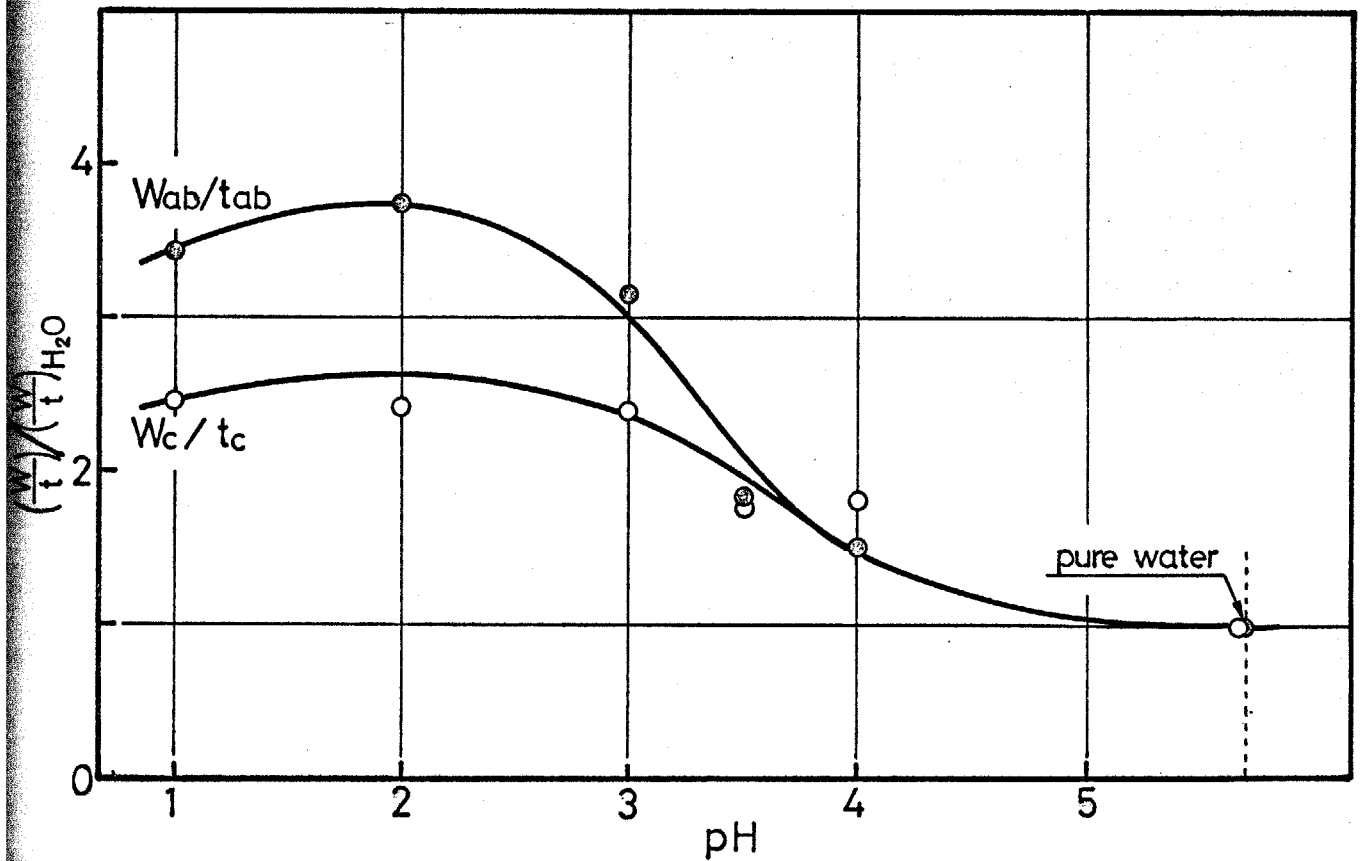
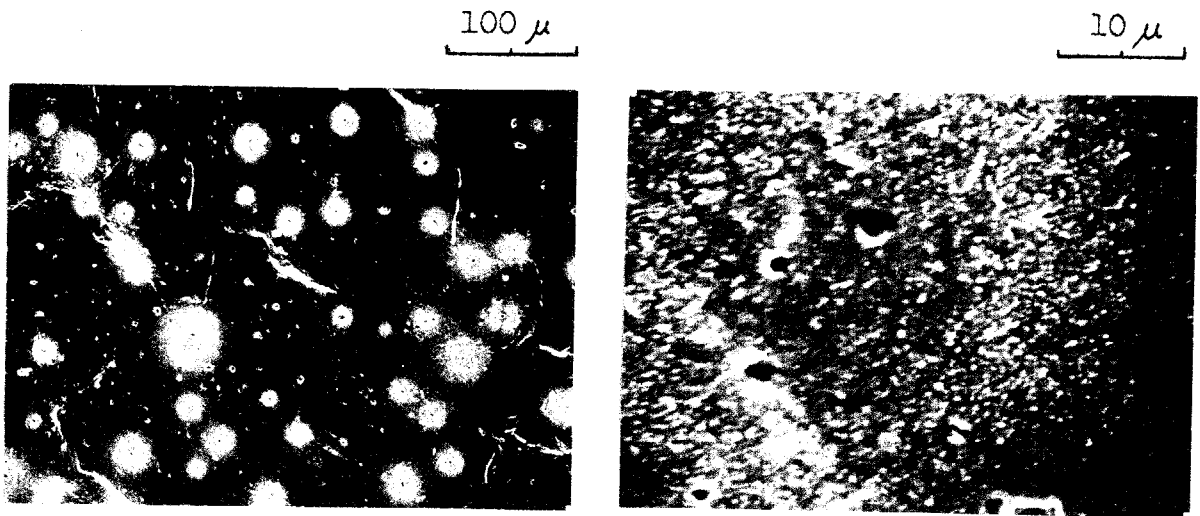


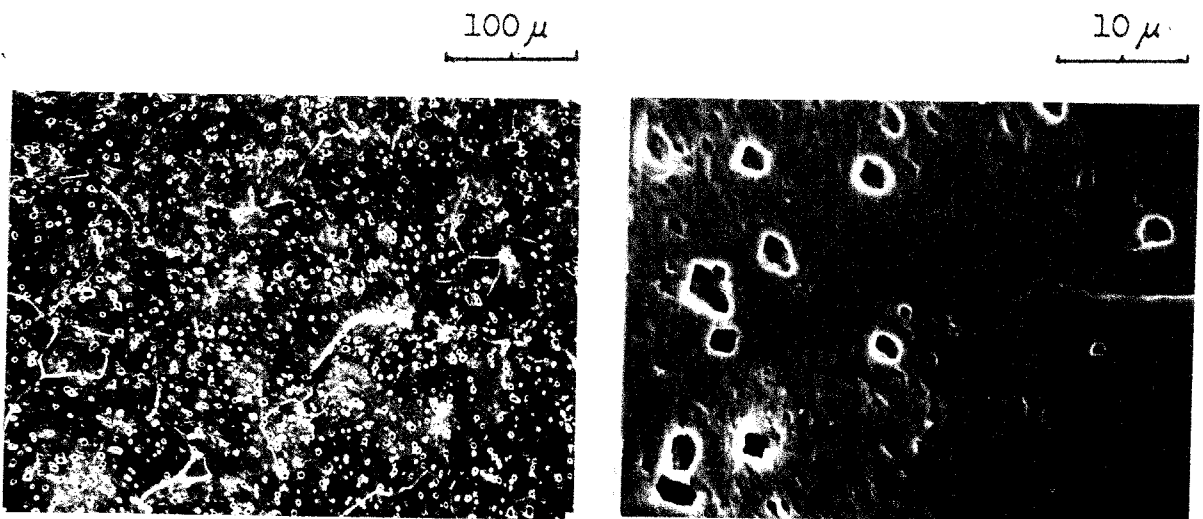
Fig. 5-6 $\frac{(W/t)}{(W/t)_{H_2O}}$ vs. pH



(x 170)

(x 1700)

Pure water (10 min)



(x170)

(x 1700)

pH 3.0 HCl (10 min)

Fig. 5-7 Electron scanning Photomicrograph of damaged surface for iron (10.1 kHz, 45μ)

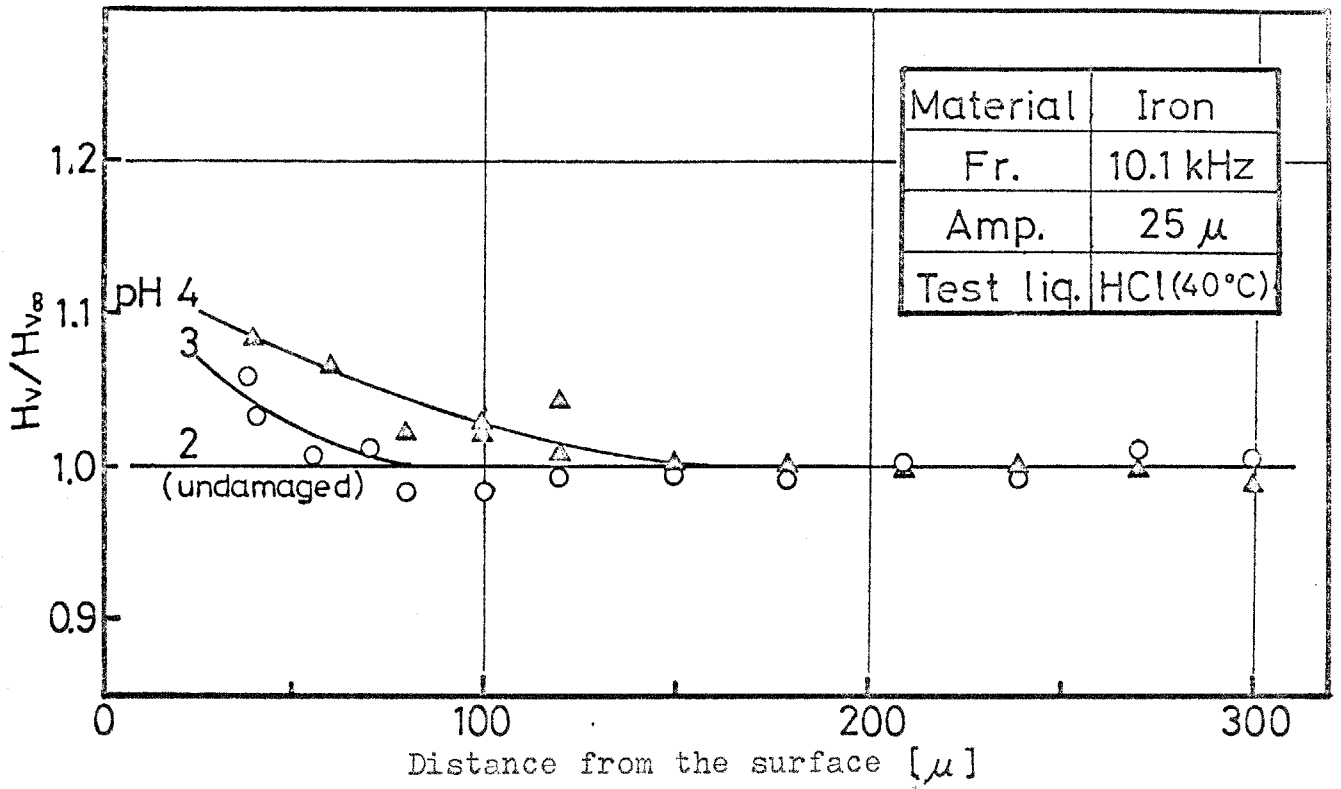


Fig. 5-8 Effect of pH on $H_v/H_{v\infty}$ vs. Distance from the surface for iron

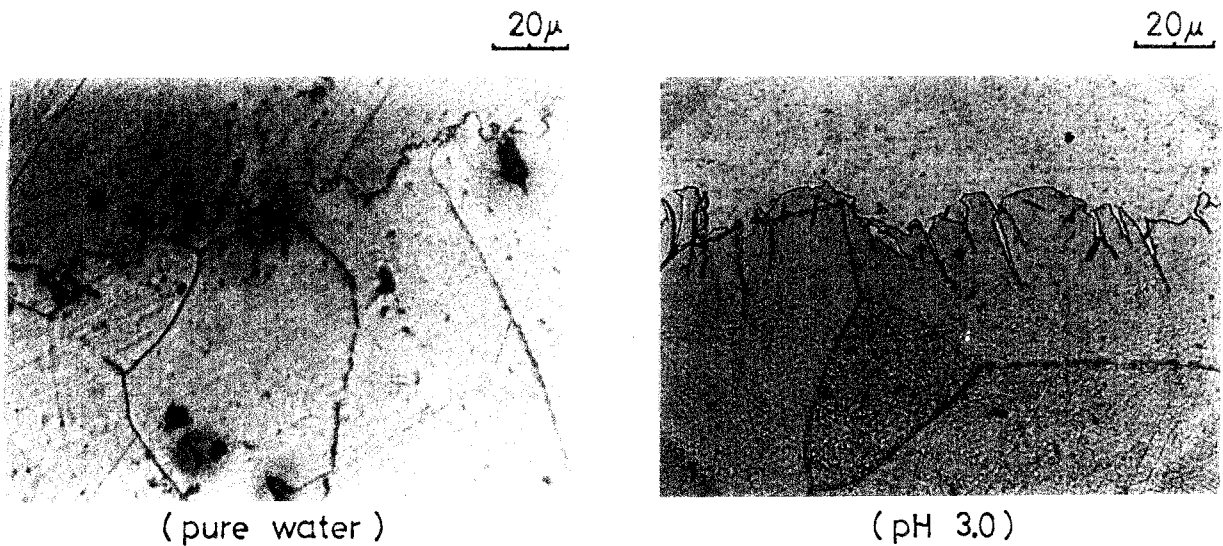
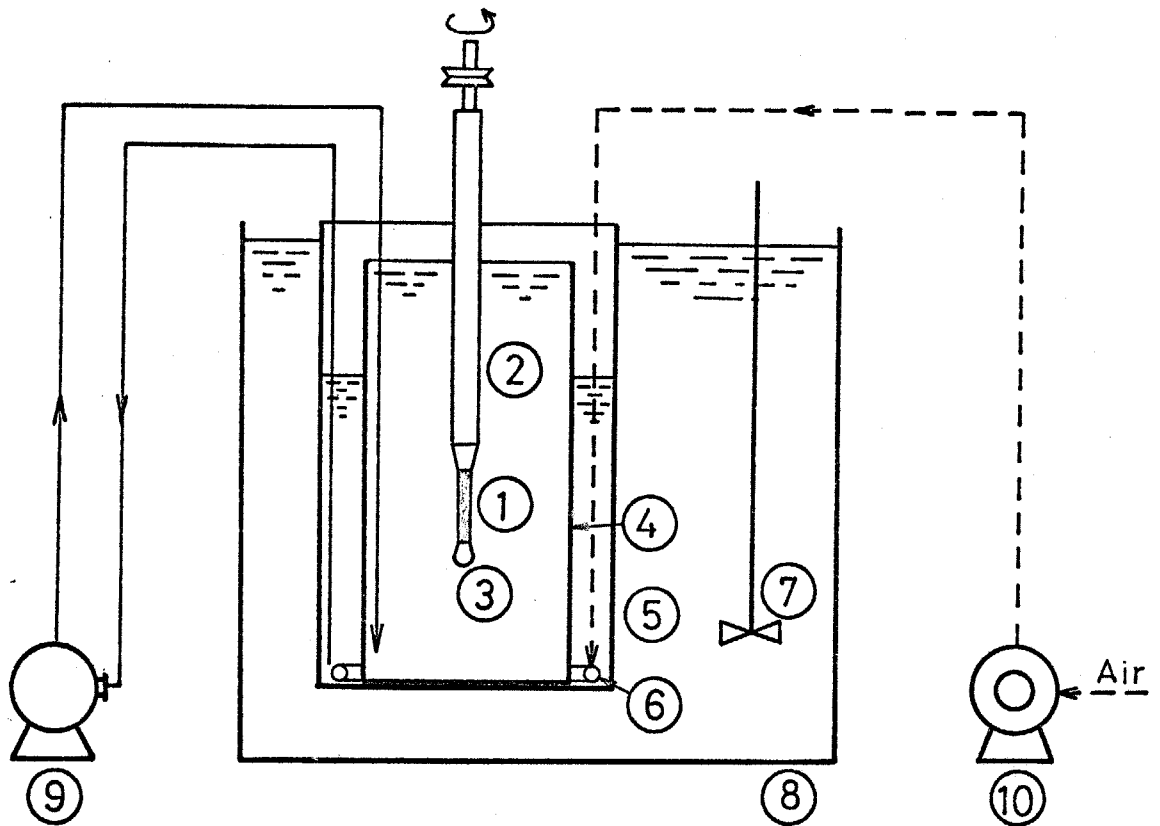


Fig. 5-9 Microstructure of cross section of damaged iron (10.1 kHz, 25 μ)



- | | |
|-----------------------|--------------------|
| 1. Test Piece | 6. Gas Distributer |
| 2. PVC Sheath | 7. Stirrer |
| 3. PVC Cap | 8. Thermostat |
| 4. Inner Glass Vessel | 9. Pump |
| 5. Outer Glass Vessel | 10. Blower |

Fig. 5-10 Schematic diagram of rotating shaft test apparatus

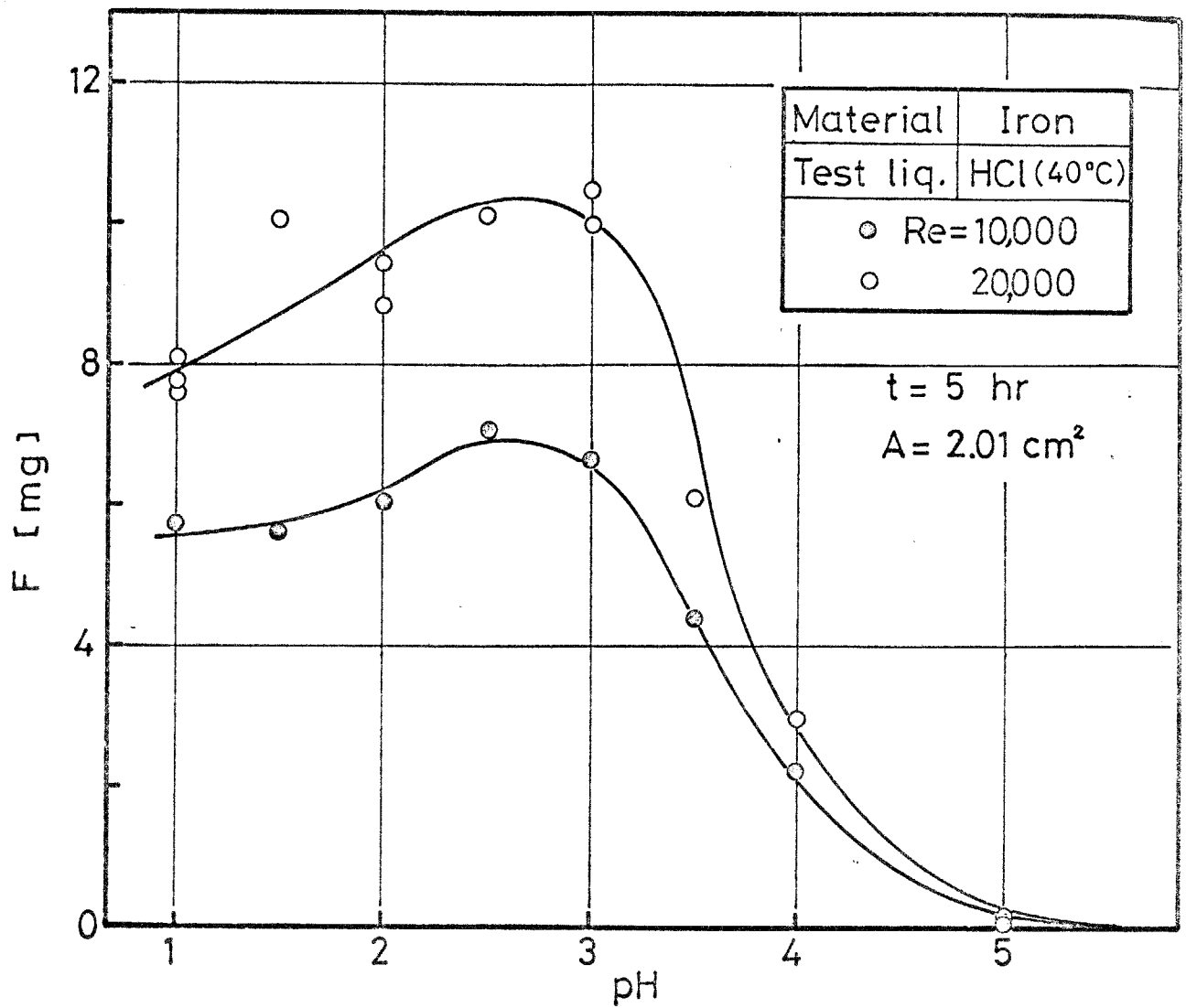


Fig. 5-11 Dissolved quantity of iron vs. pH
(rotating shaft apparatus)

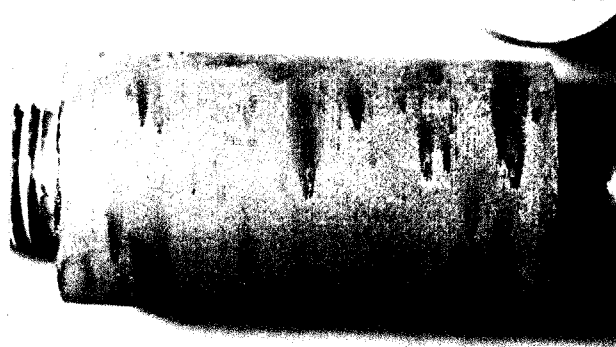


Fig. 5-12 Photograph of corroded surface of iron
(pH 3.5, 50 hr)

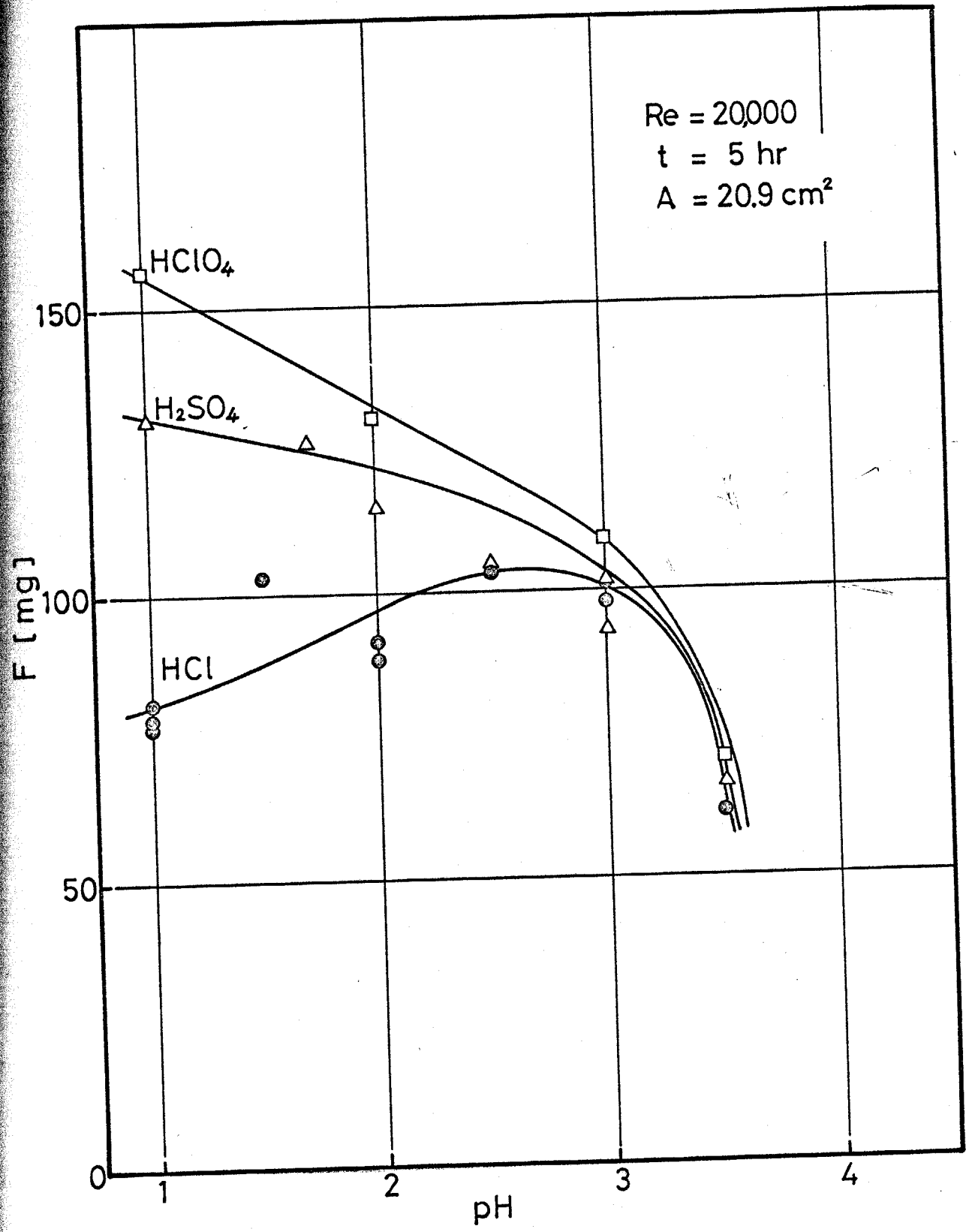


Fig. 5-13 Effect of acid on F vs. pH for iron

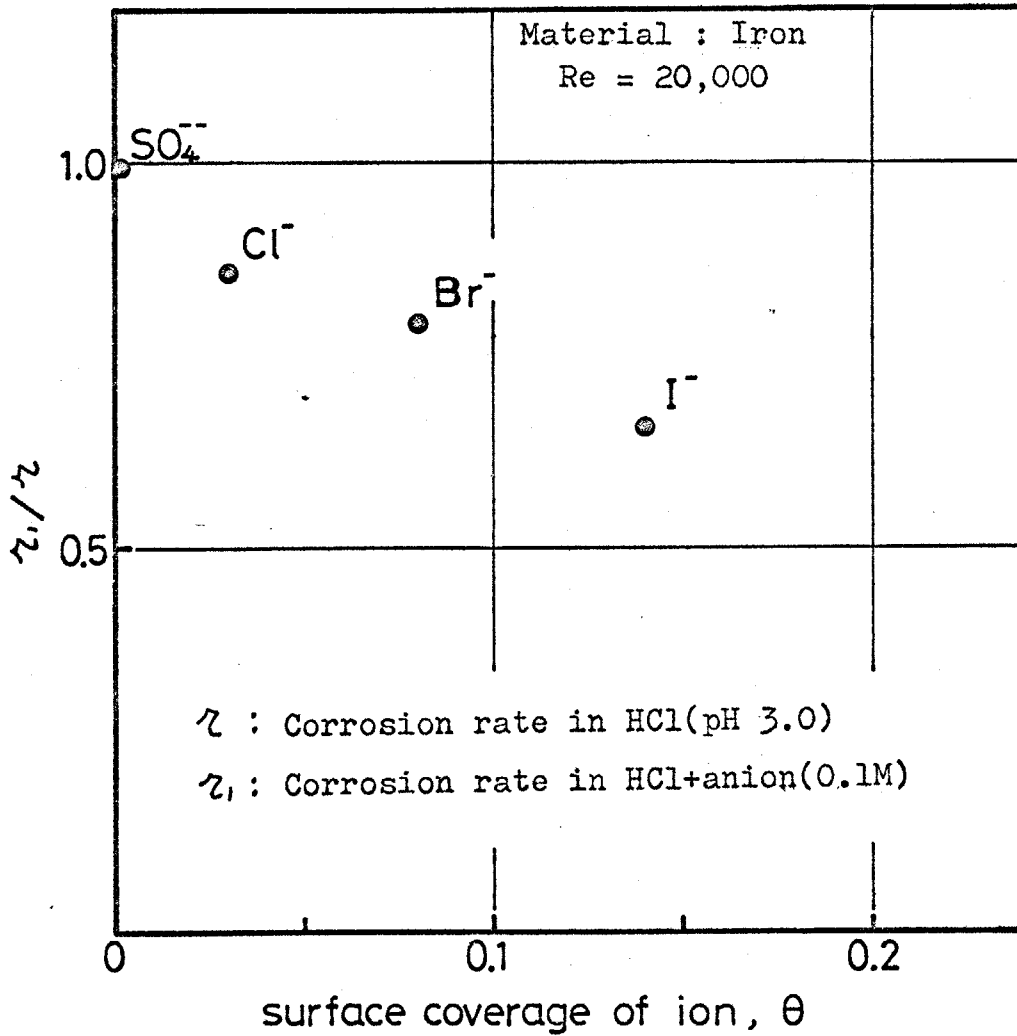
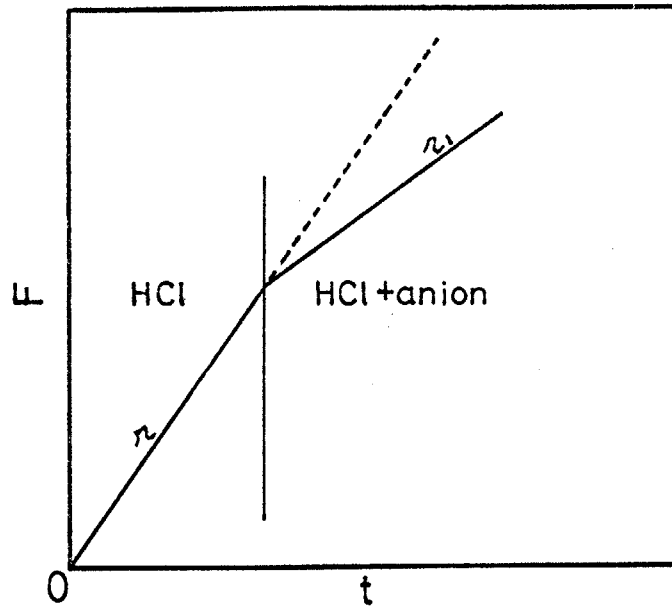


Fig. 5-14 Effect of anion on the corrosion rate

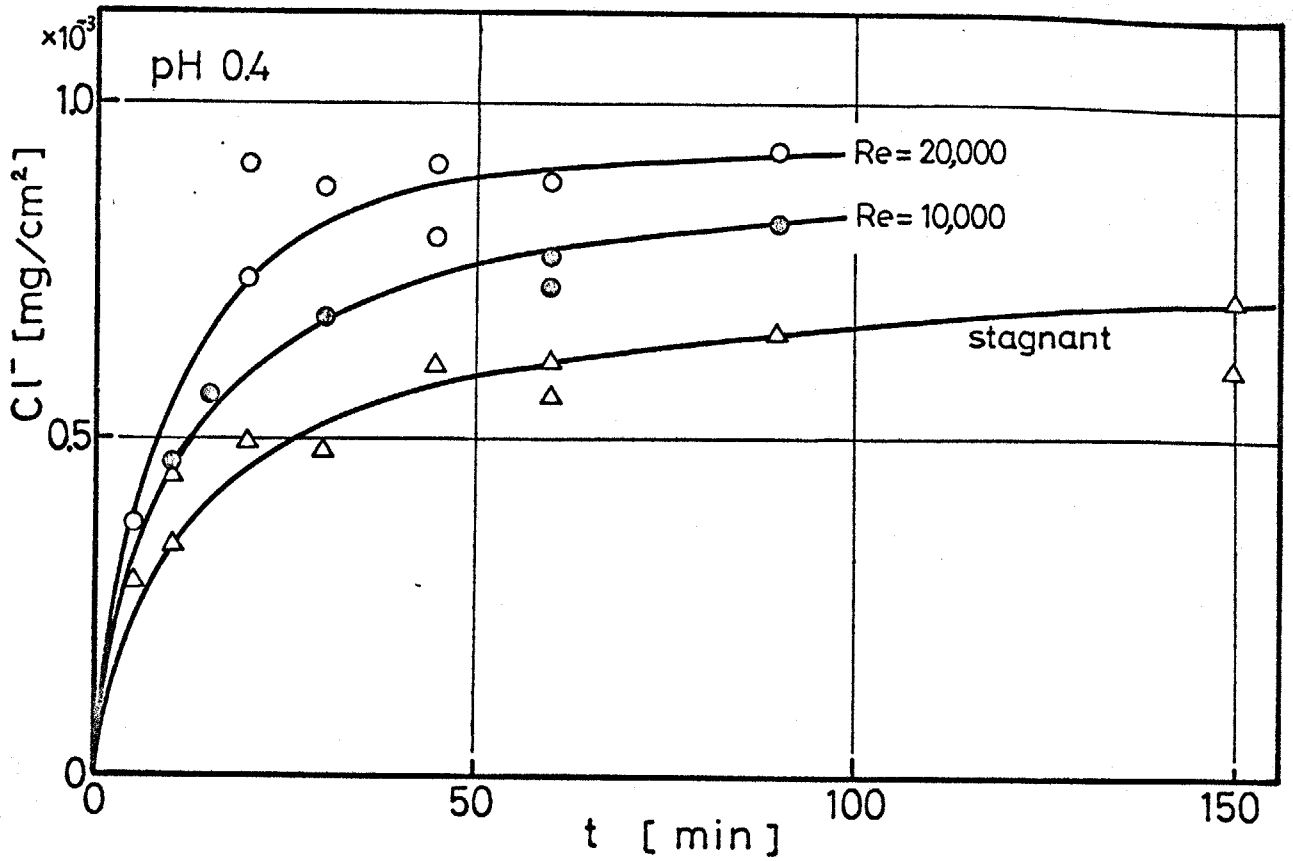


Fig. 5-15 Effect of immersion time on adsorption of Cl^-

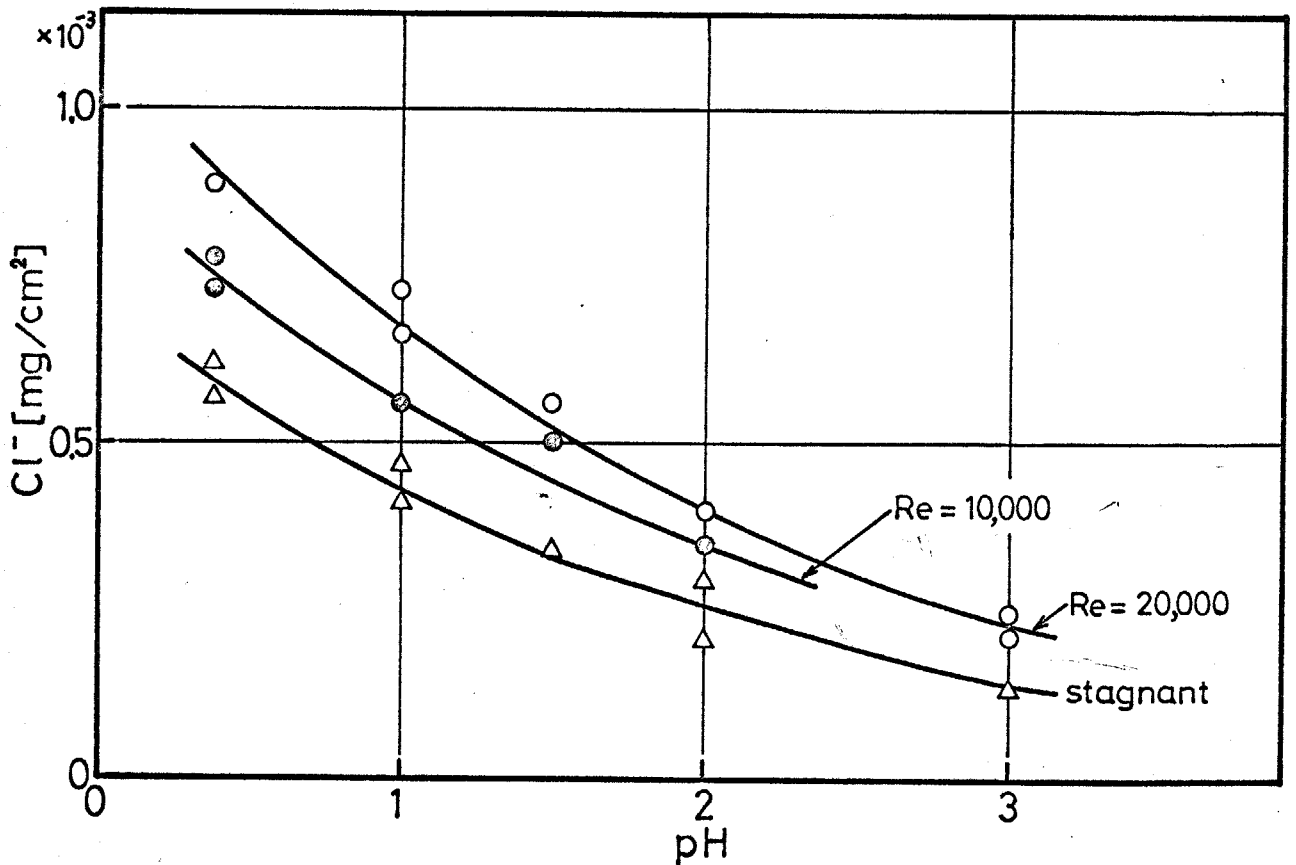


Fig. 5-16 Effect of pH on adsorption of Cl^-

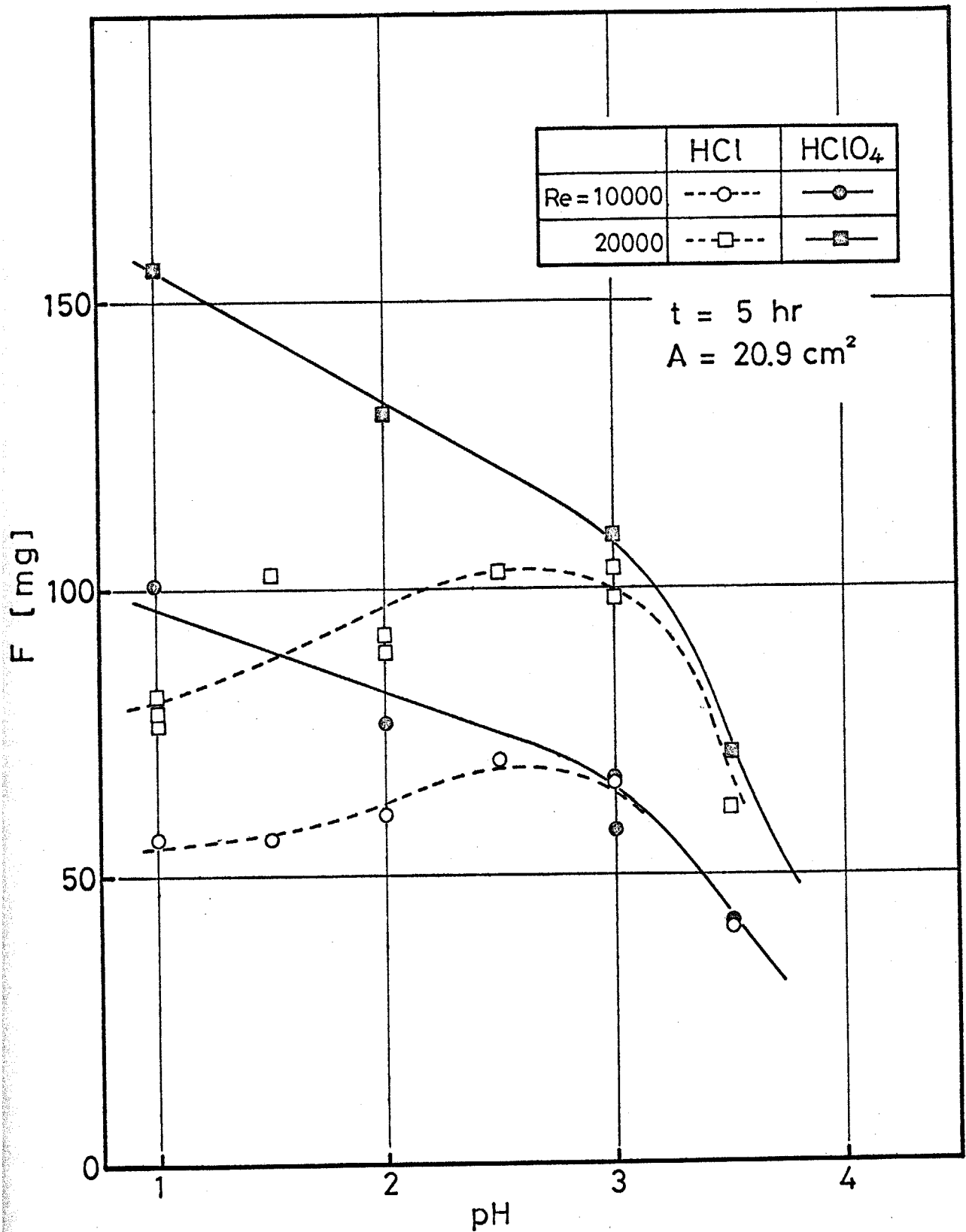


Fig. 5-17 F vs. pH for iron in HCl and HClO₄

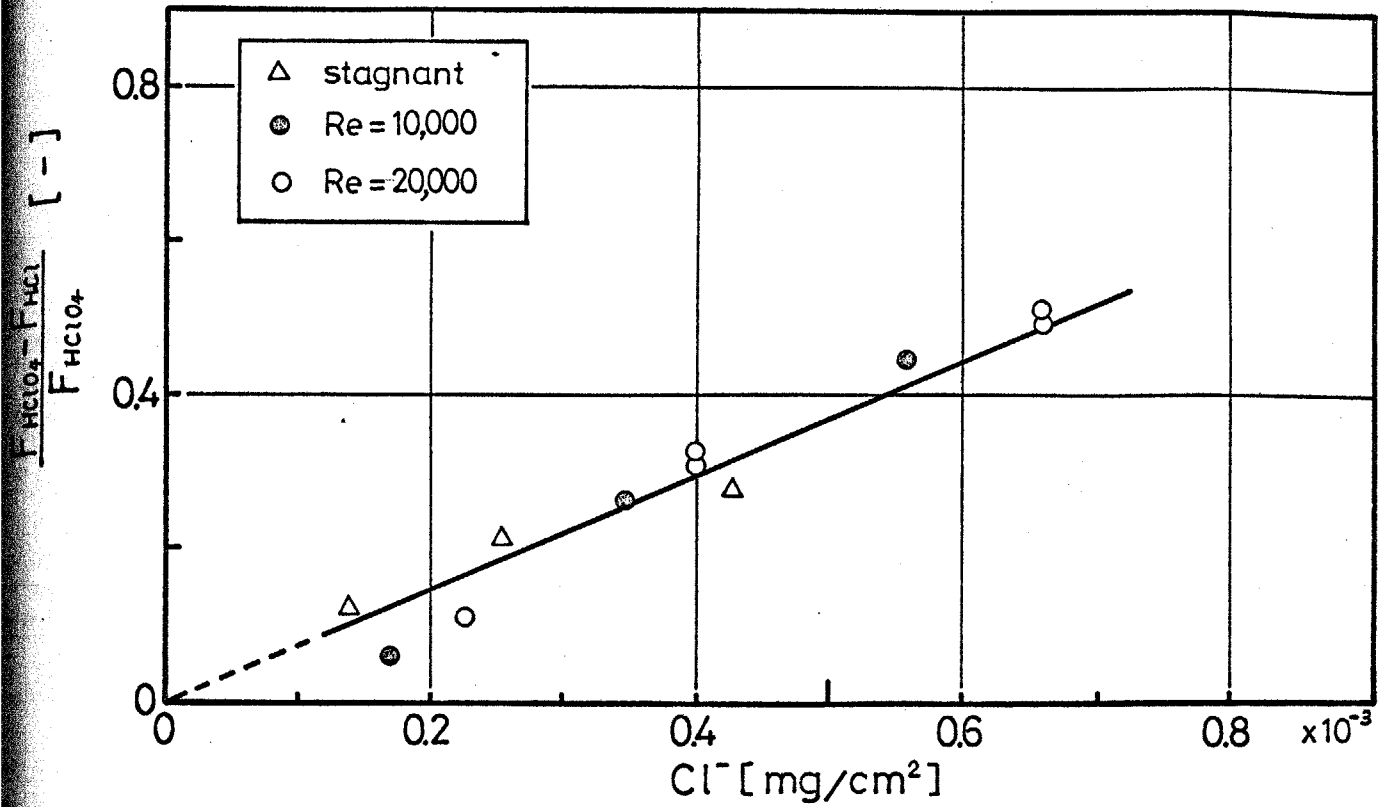


Fig. 5-18 $\frac{F_{HClO_4} - F_{HCl}}{F_{HClO_4}}$ vs. amounts of Cl^- adsorbed on iron.

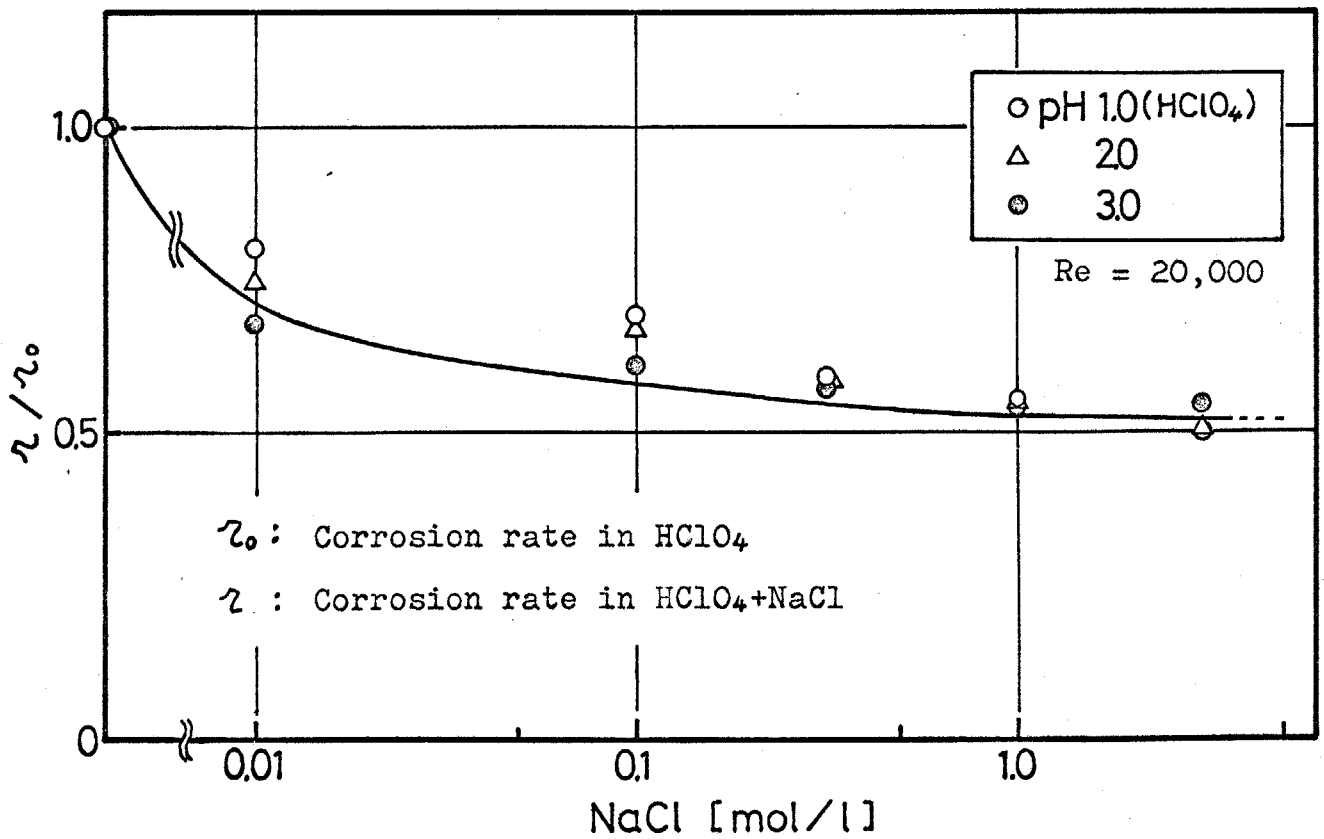


Fig. 5-19 Effect of $NaCl$ on the corrosion rate of iron in $HClO_4$

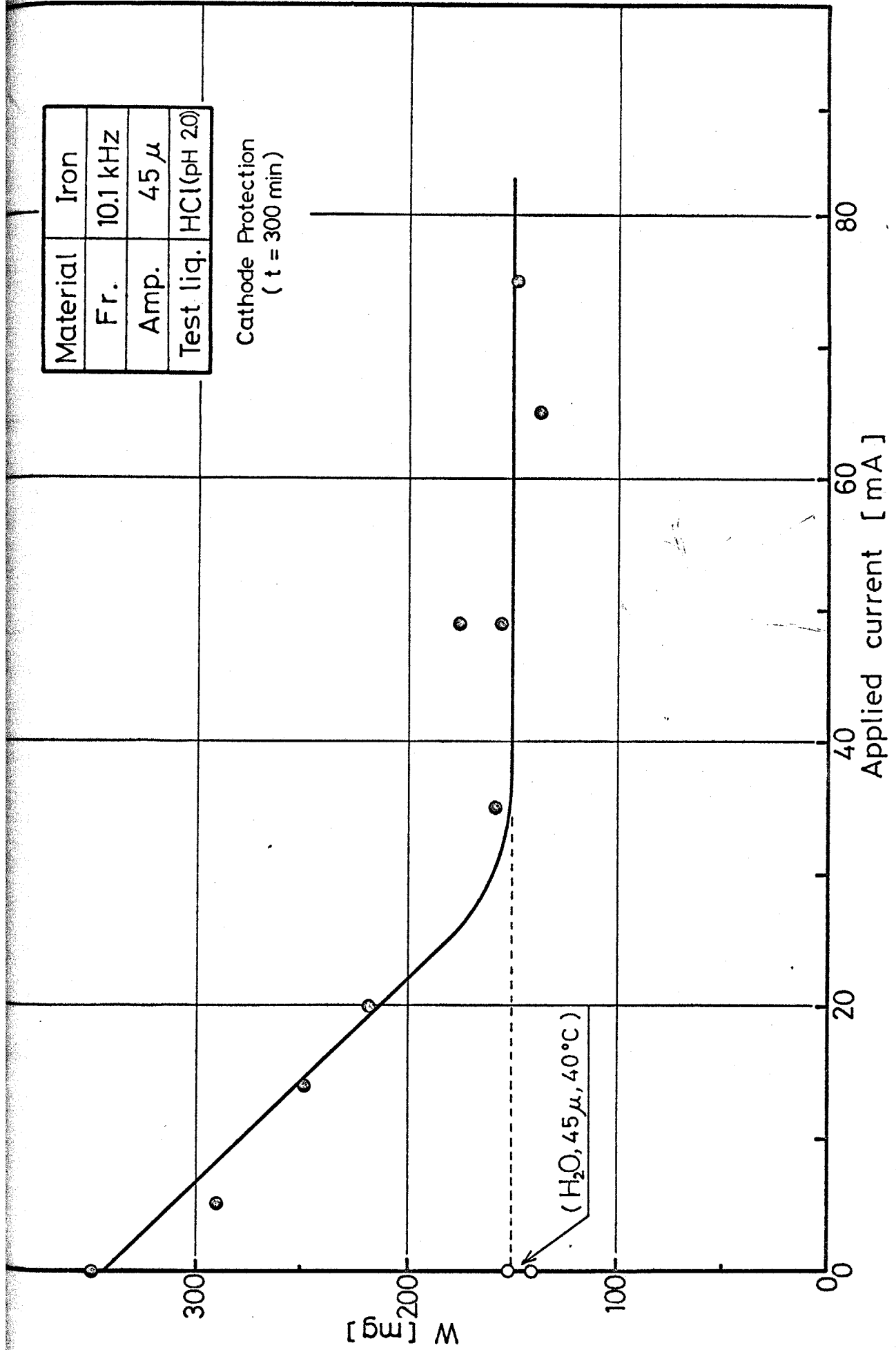


Fig. 5-20 Weight loss at t=300min vs. applied current in cathode protection

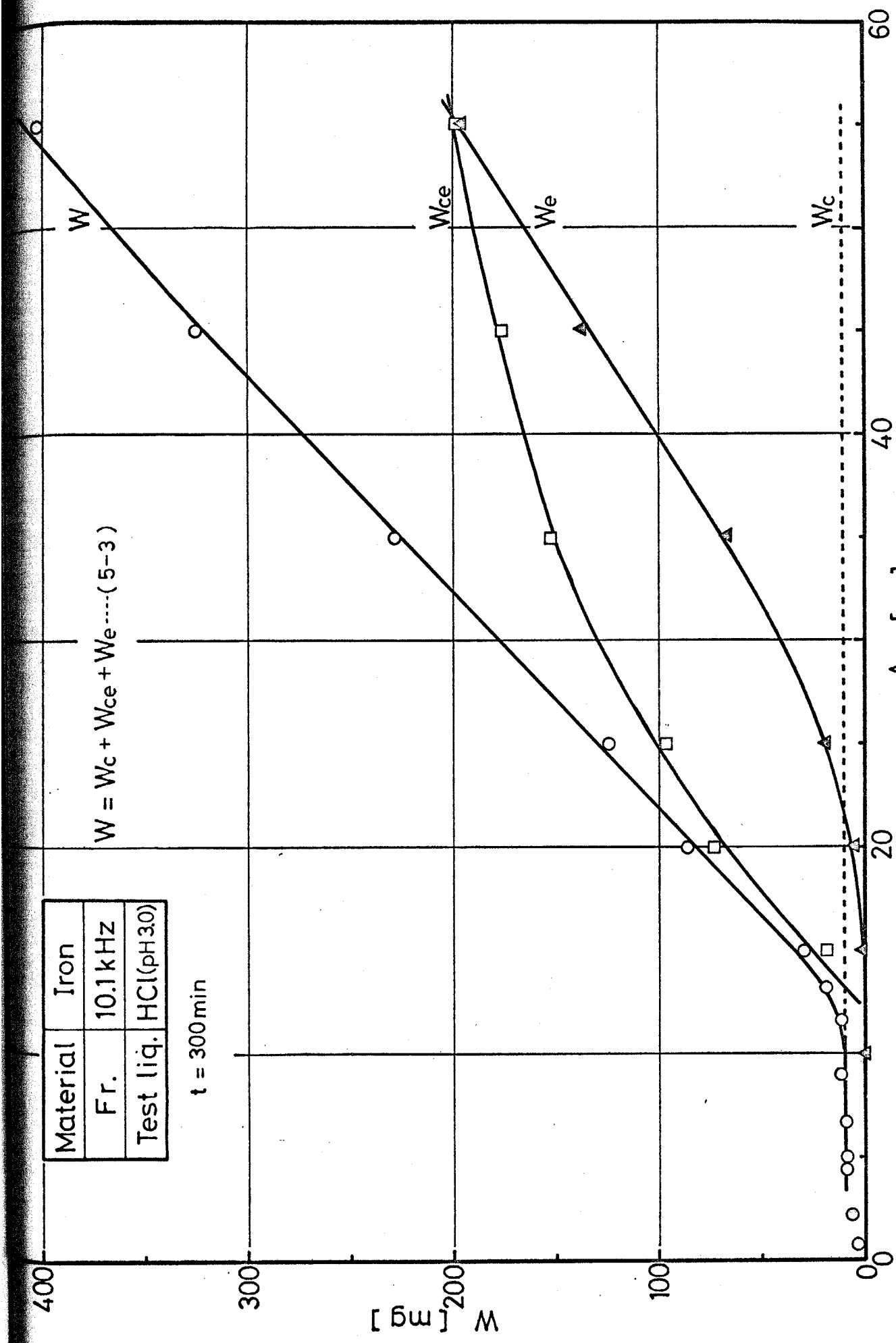


Fig. 5-21 Value of each term in eq.(5-3) vs. amplitude for iron

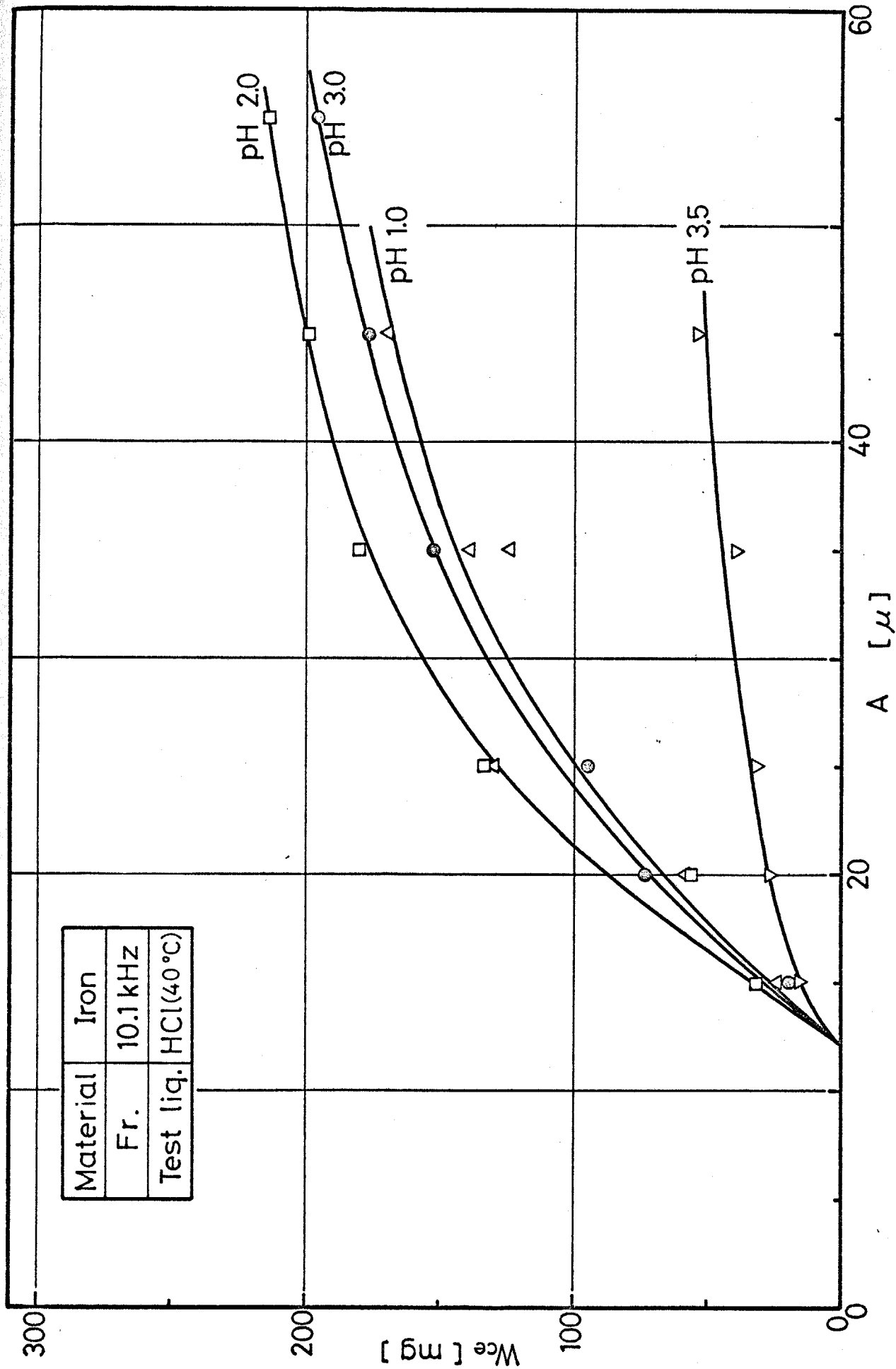


Fig. 5-22 Effect of pH on Wce vs. amplitude

$$W = W_c + W_{ce} + W_e \quad \text{-----} (5-3)$$

$$W_{ce} = a [1 - \exp\{-b(A - A_0)\}] \quad \text{-----} (5-4)$$

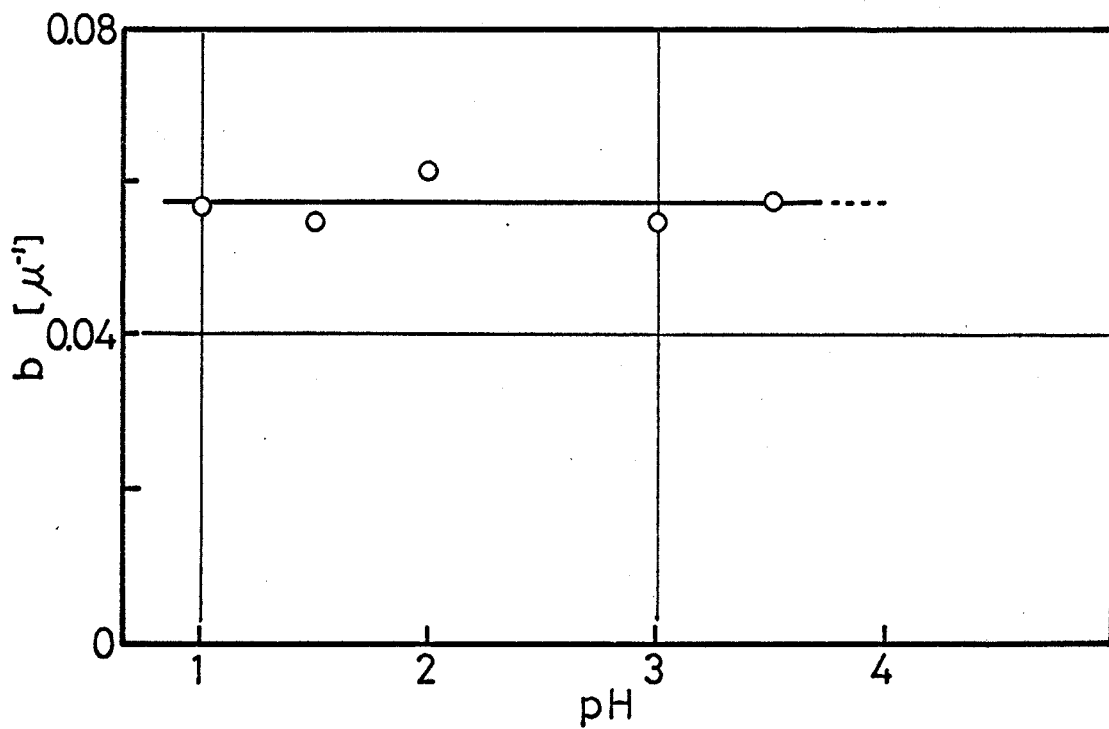
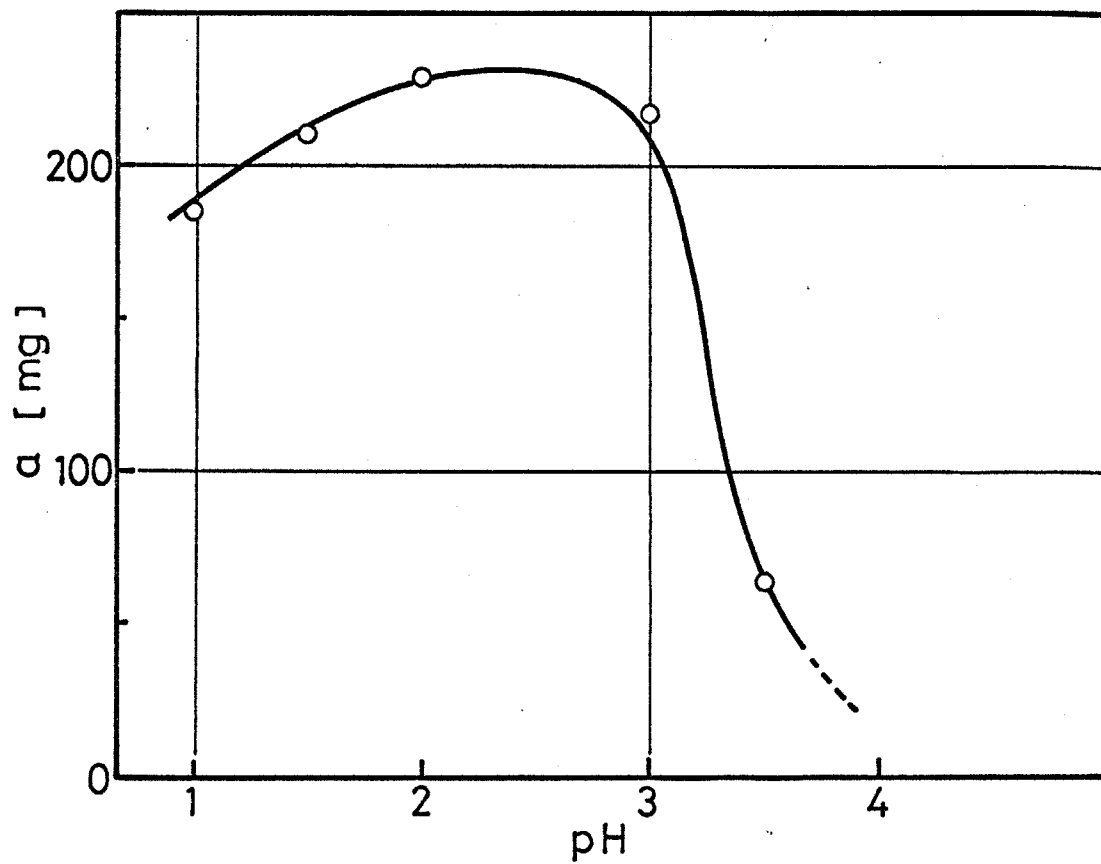


Fig. 5-23 Effect of pH on a and b in eq.(5-4)

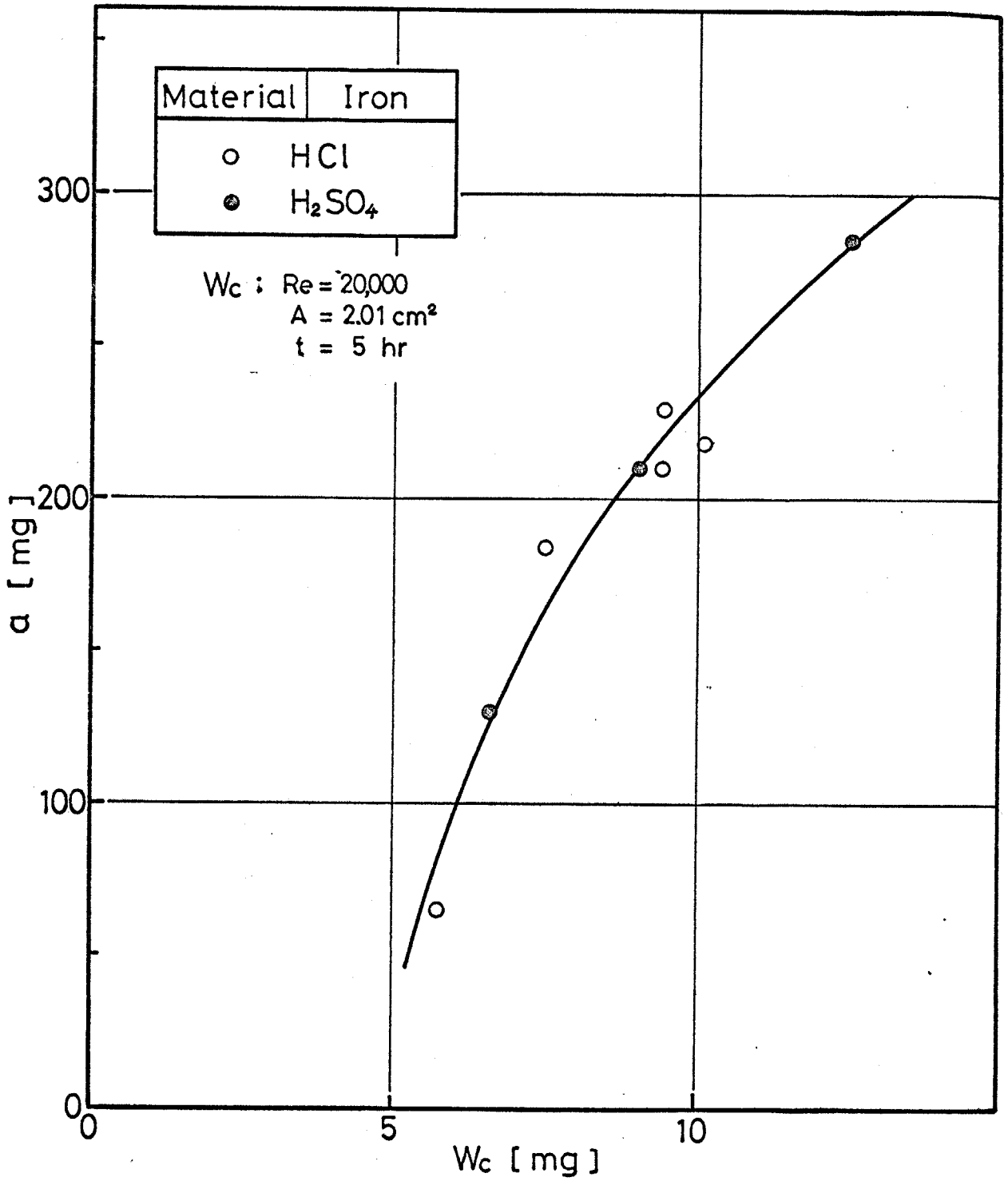


Fig. 5-24 Relationship between a and W_c

Table 5-1

(Iron)

Test liquid	pH	a (mg)	b (μ°)
HCl	3.5	65	0.058
	3.0	218	0.055
	2.0	230	0.062
	1.5	210	0.055
	1.0	185	0.056
H ₂ SO ₄	3.5	130	0.058
	3.0	210	0.057
	2.0	285	0.056

Table 5-2

(Iron, 10.1 kHz, 45 μ)

Test liquid	W _c (mg)	a (mg) (Fig. 5-24)	W _{Cal.} (mg) (Eq. 5-4)	W _{Exp.} (mg)
HCl (pH 2.5)	10.2	240	351	370
H ₂ SO ₄ (pH 1.0)	13.2	295	397	398
H ₂ SO ₄ (pH 2.0) 0.1M NaCl	8.9	208	312	312

第6章 試験片形状の影響

6.1 緒言

磁歪振動法は、試験片が小さくてすみ、試験時間を短縮でき、しかも再現性が良い、などの理由から、材料の耐キャビテーション性の迅速試験法として慣用されているが、Table 1-2(p.13)に示したように、各研究者により実験条件はさまざまである。したがって、この試験法をより一般的なものとするには、第4章で検討した振幅、振動数の影響の他に、試験片形状の影響についても検討する必要がある。

この試験片形状の影響については、今までほとんど検討されておらず、わずかに Thiruvengadam²¹⁾、Wiegand & Schulmeister²⁷⁾ の報告が見られる程度である。

本章では、まず 10.1 kHz で直径の異なる試験片を用いた実験を行ない、その影響を明らかにし、ついでこの結果を参考にして第4章でもふれておいたが、種々の実験条件（振動数、振幅、試験片直径）と損傷との関係について検討する。

6.2 試験片

本章で用いた試験片は Fig. 2-5 (p.27) の標準試験片 (16 ϕ) と試験片の直径 D だけを異なるようにしたもので、他の部分の寸法はすべて前章までのものと同じである。 D の値は 12, 14, 16, 18, 20 の 5 段階に変えた。Fig. 6-1 に 12, 16, 20 ϕ の場合を例示する。

試験前の処理、その他実験手法も、すべて前章までと同様である。

6.3 実験結果および考察

$D=12\sim 20\phi$ の試験片を用い、10 kHz で損傷実験を行なったが、いずれの場合も、まず表面が一様にあれ、ついで中央部に穴を生じ、さらに時間が経過すると、周辺部にもほぼ同心円状に穴を生じる。いま、このあれの部分 (Fig. 6-2 参照) の直径を d 、周辺部の穴のあく位置の径を d' (Fig. 6-3 参照) とし、これらとの関係について検討を行なう。

d と D との関係を示したのが Fig. 6-2 である。実験範囲内では、ほぼ直線的な変化を示し、これらはいずれも

$$d = D - 2C_1 \quad (6-1)$$

$$\text{あるいは } D - d = 2C_1 \quad (6-2)$$

で表わすことができる。すなわち、振幅が決まれば、試験片の大きさ(D)には無関係に(D-d)つまり、試験片周辺部の損傷を受けない部分の中が一定値C₁を持つことになる。したがって、周辺部の損傷を受けない部分は、試験片の運動状態(振幅)によって決まる、一種の end effect によるものと考えられる。

つぎに、d'についてDおよびdとの関係を示すと Fig. 6-3, Fig. 6-4 が得られる。Fig. 6-4に見られるように、すべての点が一本の直線上にあり、振幅あるいは試験片の直径が違ってても、dが決まればd'は一義的に定まることを意味する。この、dおよびd'は、第4章で述べたように、試験片表面上の圧力振幅分布と密接な関係があるものと考えられる。すなわち、dは圧力振幅がある値以上になる領域、d'はそれが極大値を示す位置に相当するるのである。

つぎに、損傷速度と試験片の大きさとの関係について検討してみる。

いままで述べた結果からも、損傷との比較をする場合、Dよりむしろdを用いるべきである。そこで、いまRが一応定常期に達したと考えられる $t=300$ min後における損傷速度とdとの関係を示すと Fig. 6-5 が得られる。これより

$$R = k_1 d^2 \quad (k_1 = f(\text{Amp.})) \quad (6-3)$$

が成立しているのがわかる。いま、損傷部の面積を S とし、単位面積当りの平均損傷速度を τ とすると (6-3) 式から

$$\tau = \frac{R}{S} = \frac{R}{\frac{\pi}{4} d^2} = k_2 = \text{const.} \quad (6-4)$$

が導かれる。

D に対して τ をプロットすると Fig. 6-6 のようになり、明らかに (6-4) 式が成立しているのがわかる。したがって、損傷量について検討する場合、損傷部の径 d を重視する必要がある。

さて、第4章で、振幅、振動数と損傷との関係を検討するには気泡挙動を考慮する必要があると指摘したが、その気泡挙動の差は d の違いとして現われていると考えられるから、 d を考慮しつつ振幅および振動数と損傷との関係について検討してみる。

損傷速度は、試験片から放射されるエネルギーに比例すると考えられる。この単位時間、単位面積当り放射されるエネルギー I (erg/cm².sec) は、^(例えば 81)

$$I = 2\pi^2 f^2 \rho c A^2 \quad (6-5)$$

で与えられる。ここで f : 振動数 (1/sec), ρ : 液の密度 (g/cm³), c : 液中の音速 (cm/sec), A : 振動振幅 (cm), である。また、損傷部の面積 S は $\frac{\pi}{4} d^2$ であるから、損傷部面積当り、単位時間に流れるエネルギー E (erg/sec) は、

$$E = I \cdot S \propto f^2 A^2 d^2 \quad (6-6)$$

となる。したがって

$$R \propto f^2 A^2 d^2 \quad (6-7)$$

となり、(6-7)式から前の(6-3)式あるいは(6-4)式が成立するのは、いわば当然のことと思われる。

(6-3)、(6-4)式は、振動数、振幅が一定の場合であるが、これらが変わる場合について検討したのが Fig. 6-7 である。すべての点が傾き 1 の直線上にあることから、(6-7)式の成立することが証明された。

以上の結果から、 d の値が変われば (Fig. 4-6, Fig. 6-2 参照)、ある条件下 (振動数、振幅、試験片の直径) での損傷速度から他の条件下でのそれを求めることが可能となる。すなわち、多くの研究者により種々の条件下での実験データが発表されているが、これらすべてある標準の実験条件下における損傷速度に変換して比較できることになる。

6.4 結 論

本章では、直径の異なる試験片を用い、これがキャビテーション損傷に及ぼす影響につき検討し、つぎの結論を得た。

- 1) 試験片表面上で、周囲の損傷を受けない部分のうち $(D-d)$ は、振幅が一定であれば、試験片の直径 D には無関係に一定値を持つ。
- 2) 単位面積当りの平均損傷速度 (η) は、 D に関係なくほぼ一定値を示す。
- 3) 損傷量について検討する場合、損傷部の直径 d と重視する必要があることを指摘した。この点を考慮してキャビテーション損傷と振動数、振幅、試験片の直径、との関係を示す半理論式(6-7式)を提出した。この式により、実験条件の異なる場合の損傷量の相互の比較が可能になった。

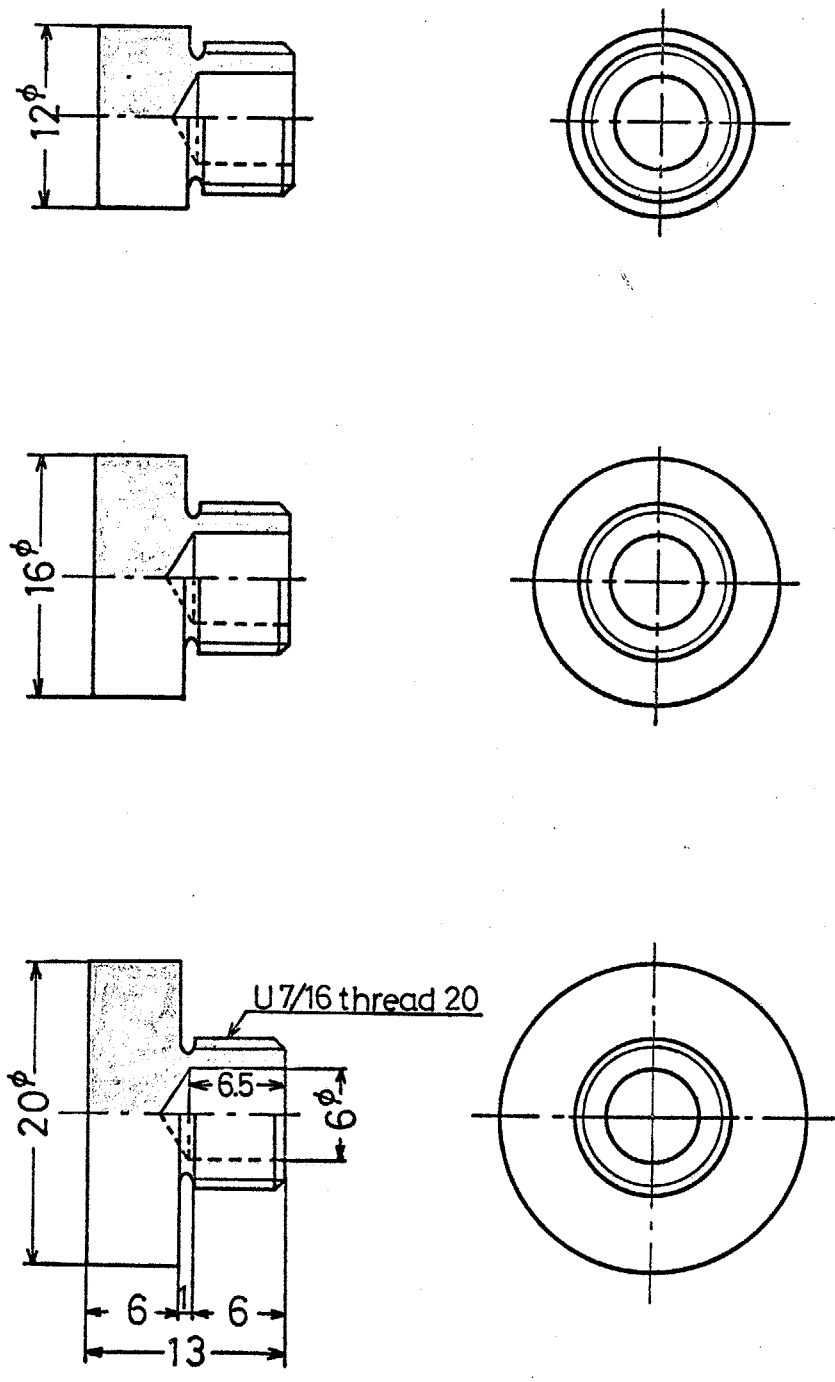


Fig. 6-1 Test specimen(D= 12ϕ , 16ϕ , 20ϕ)

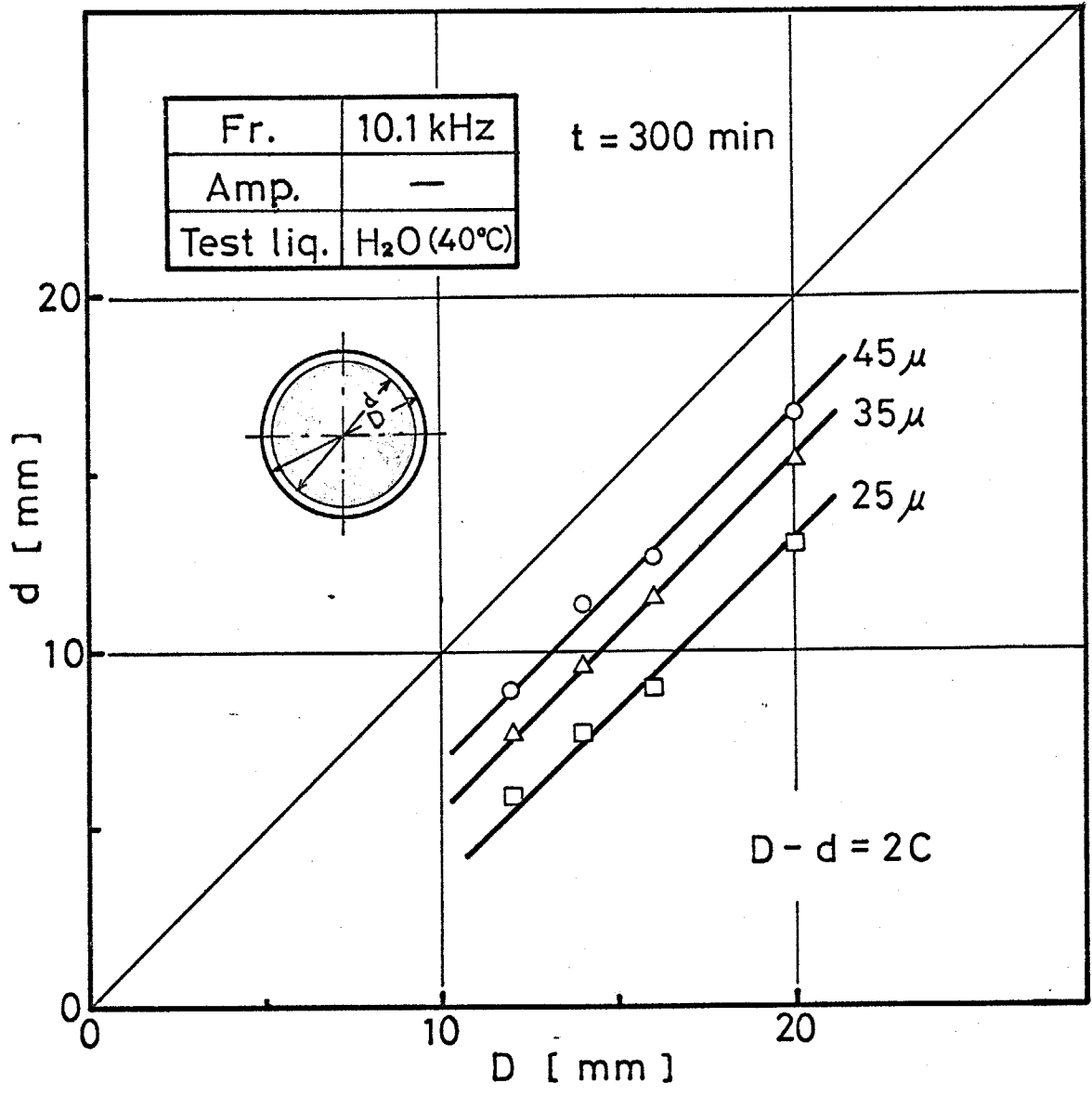


Fig. 6-2 Relationship between d and D

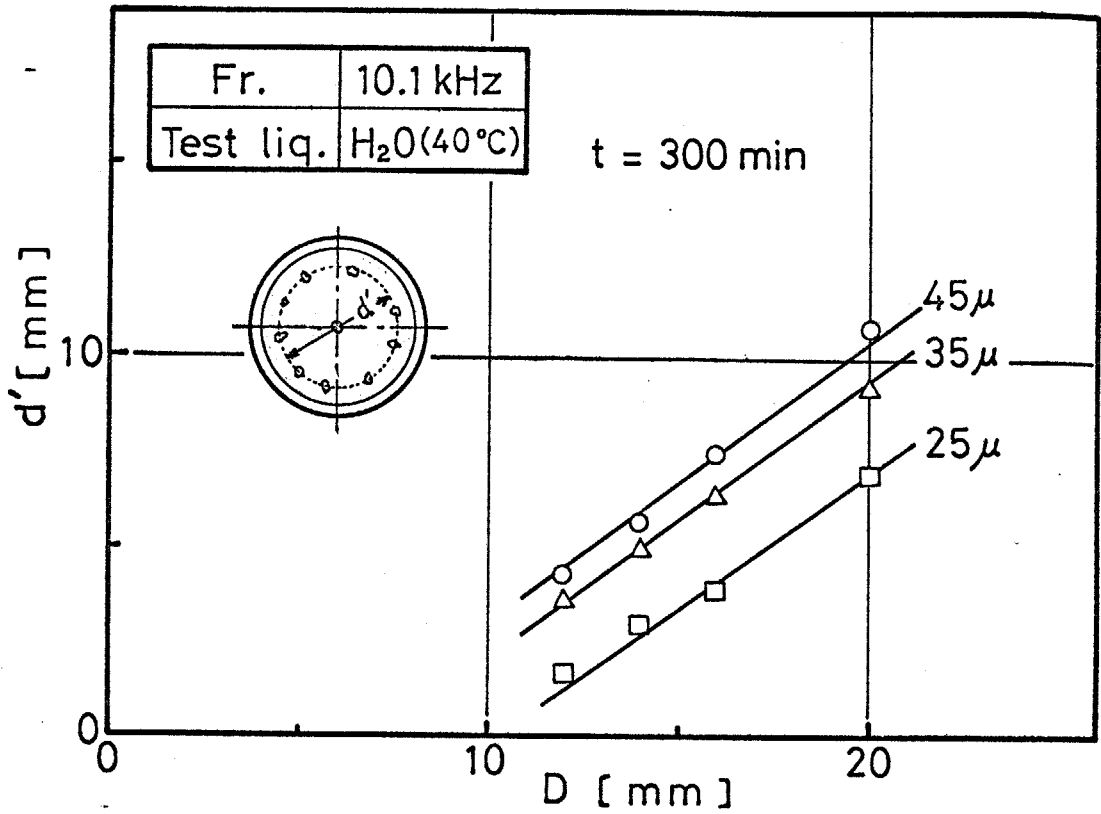


Fig. 6-3 Relationship between d' and D

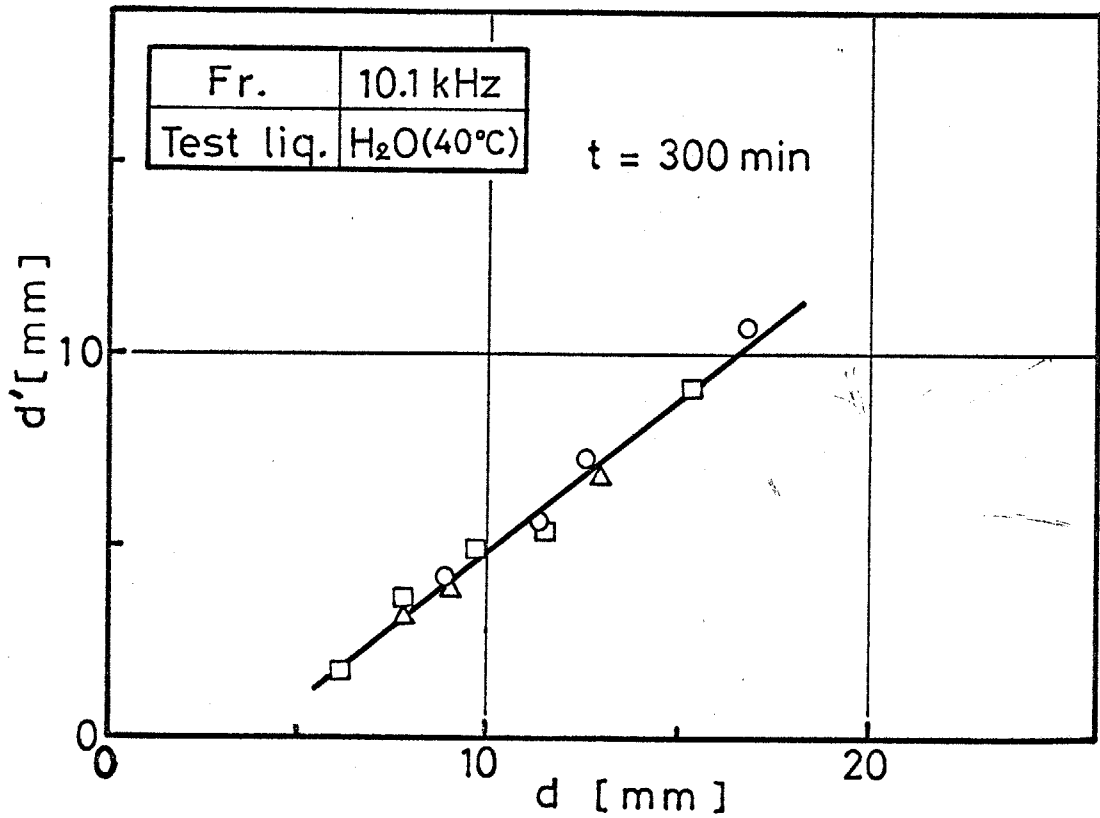


Fig. 6-4 Relationship between d' and d

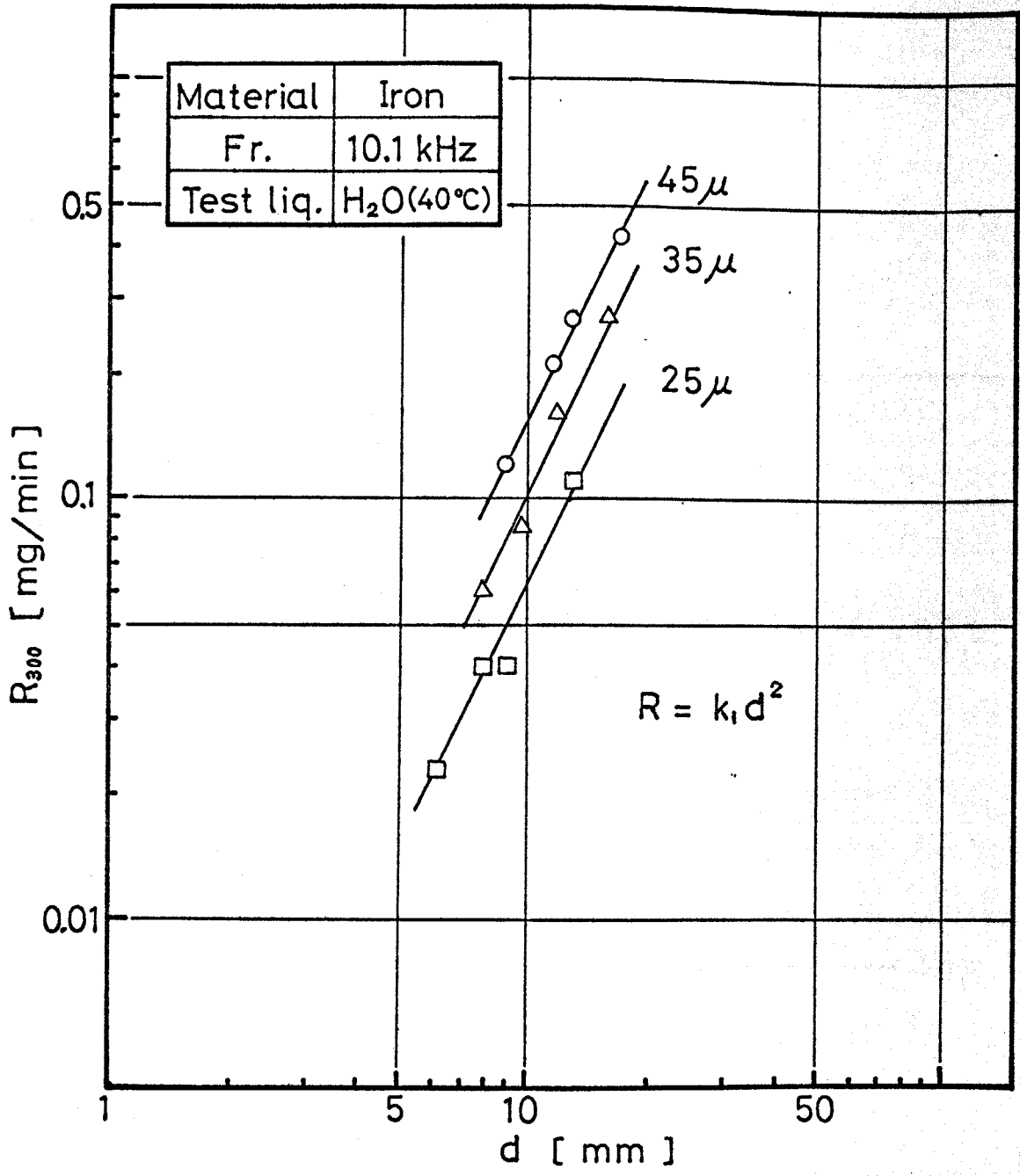


Fig. 6-5 Effect of diameter of eroded area on the erosion rate at t=300 min

$$R = k_1 d^2$$

$$r = \frac{R}{S} = \frac{R}{\frac{\pi}{4} d^2} = k_2 = \text{const.}$$

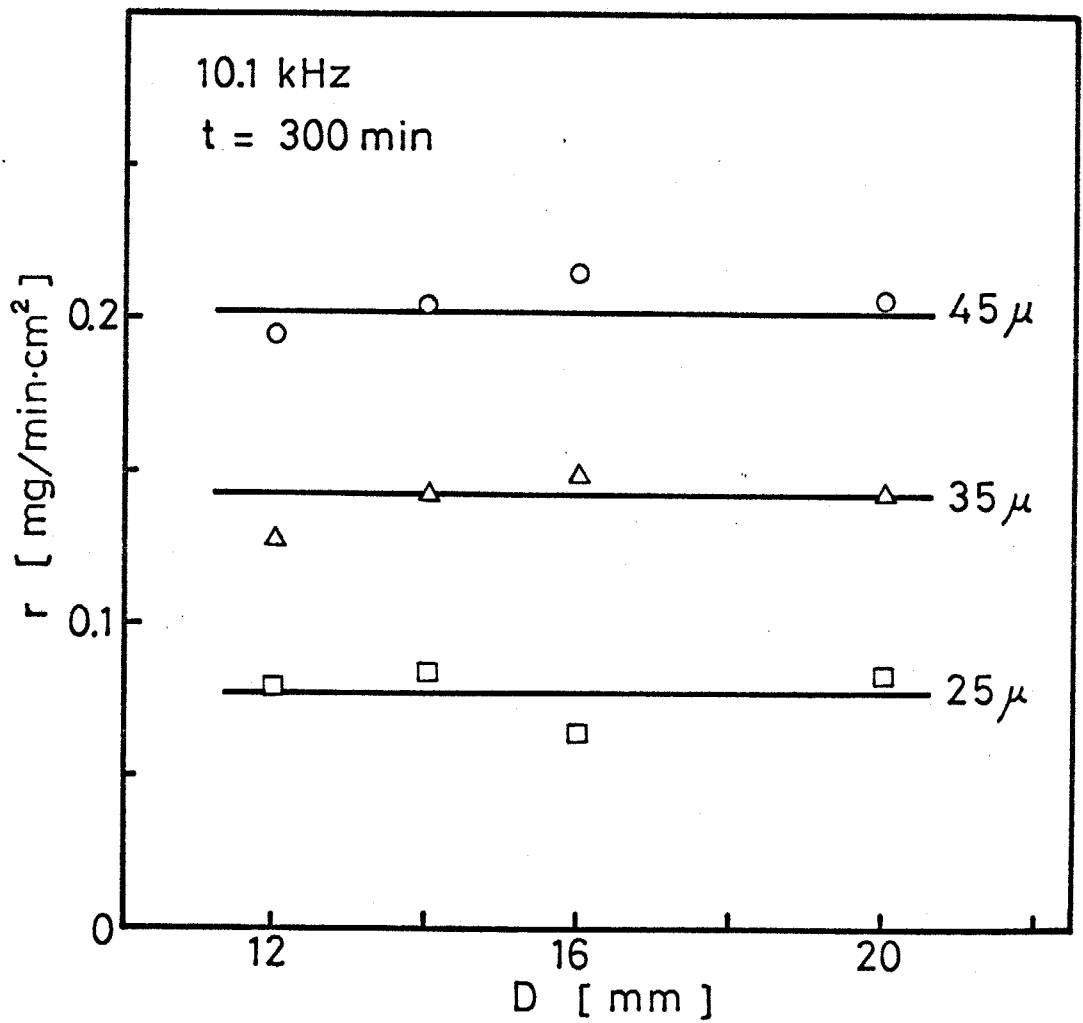


Fig. 6-6 Effect of diameter of specimen(D) on the average erosion rate(r)

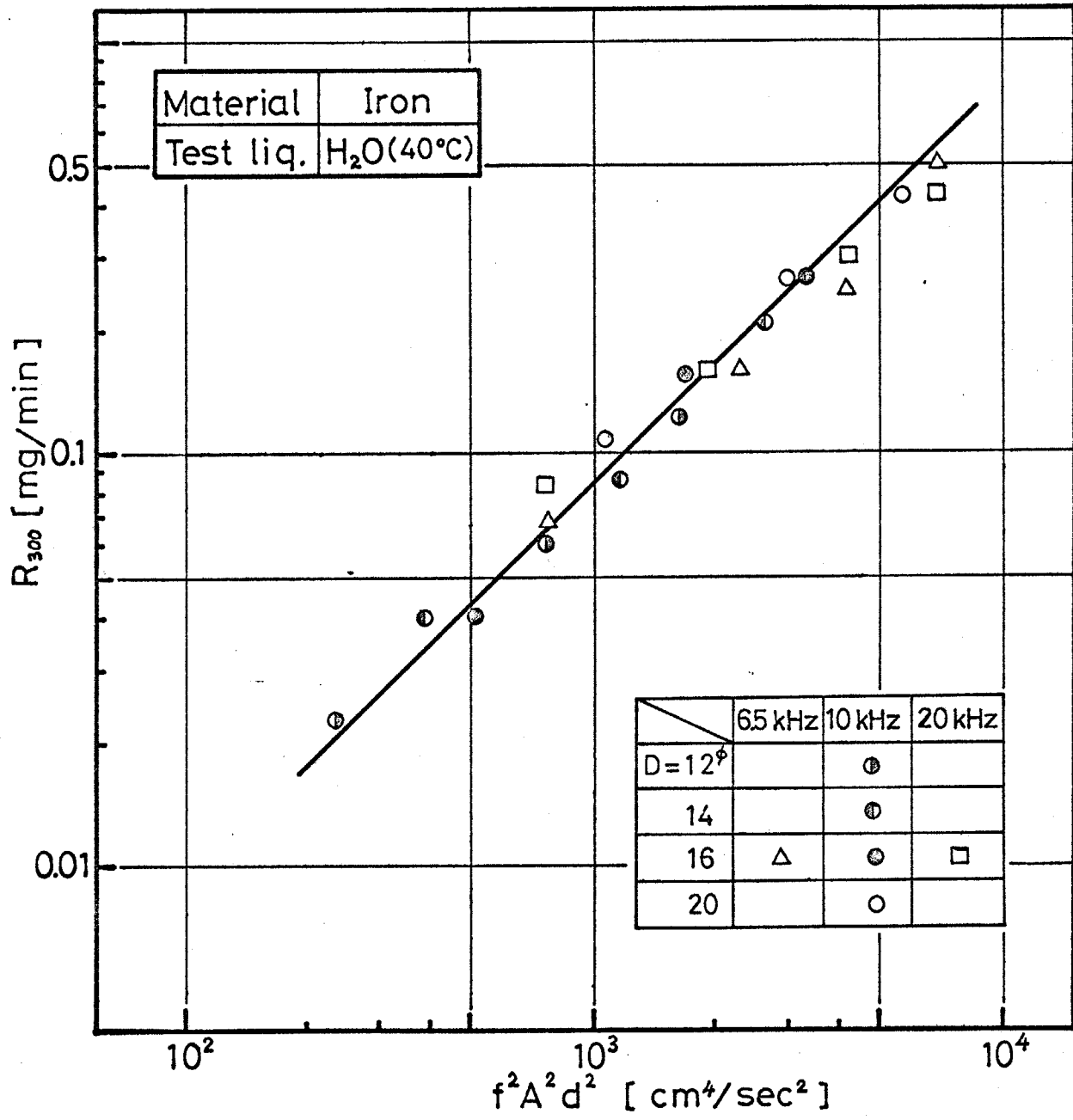


Fig. 6-7 Relationships between the erosion rate at t=300min and $f^2 A^2 d^2$

第7章 キャビテーション損傷機構

7.1 緒言

前章までは、磁歪振動法における損傷速度に影響する重要な因子である、試験時間、液温、振幅、振動数、さらにコロージョンに着目し、それぞれ効果について明らかにして来たが、本章では、以上の結果を総合的に検討し、ウォータートネル法における損傷機構（付録参照）とも関連させながら、磁歪振動法におけるキャビテーション損傷機構について論ずる。

7.2 実験結果および考察

気泡の崩壊により、材料に衝撃圧が作用すると、多少の潜伏期の後、表面あざさが増加し始める。すなわち、単に表面に塑性変形も生ずるばかりでなく、Fig. 5-7の走査電顕による写真に示すように、表面には小さなピットが見られる。つまり、少量の材料が表面から脱離することを示している。その後、表面あざさはほぼ飽和に達し（Fig. 7-1）；それ以上増加しないが、表面からの脱離は激しくなる。このように、材料は試験片表面で脱離を生ずる一方圧縮応力により塑性変形を生じ、それが除々に進行して行く。この段階が(a)、(b)期

間 (Fig. 3-4 参照) に相当する。

塑性変形が十分進展すると肉眼でも観察し得る穴を生じ始めるが、この穴のあき始めるまでの時間は、当然衝撃圧の大きさによって異なる。10 kHz を例にとると、衝撃圧は中央部で最大となるため、まず中央部に穴を生じ、ついで衝撃圧が極大となる同心円状の周辺部にも生じ始める。振幅による差も、この衝撃圧の違いによるものである。また、この穴が生じ始める際の塑性変形量は、材料の種類、温度、あるいは後で述べるコロージョンの影響の有無によっても異なってくる。

試験片のほぼ全面にわたって塑性変形が十分進展し、それに伴う硬化も最大に達した後、穴の数および面積を増す期間が(c)期間であるが、この期間ではすでに塑性変形によりひずみ硬化を受けた材料が損傷を受けるため、損傷速度は(a),(b)期間のそれよりも大くなる。

損傷が均一に生じないうで、多数の穴を生じる原因は、材料の不均一性により、塑性変形量が穴を生じ始める際の条件に達する時間が試験片の場所によって異なり、さらに、一旦穴を生じると、その周辺の応力状態が2次元から3次元に変化し、他の部分より損傷を生じやすくするため、その場所を中心として損傷が進む結果であろう。この事実は、Fig. 3-8 に見られるように、一旦穴を生じた後は塑性変形の度合が小さくても損傷を生じていることから明らかである。

穴の数が多くなり、またその大きさもある程度以上になると、気泡がその中にとじ込められた状態で、発生、消滅をくり返すため、衝撃圧が緩和され、損傷速度は(c)期間のそれより低下してくる。すなわちこれが(d)期間である。

以上はコロージョンが無視できる場合の損傷機構であるが、これにコロージョンが加わると、まず試験片表面が比較的平坦で穴もあまり生じていない段階(a),(b)期間)では、Fig. 5-7に見られるように、多数のピットを生じ、その切欠効果により損傷は純エロージョンの場合に比してより脆性的なものとなる。すなわち、表面ではピットの形成により表面あれが増し、一方材料は塑性変形する。そして純エロージョンの場合と同様に塑性変形が十分進行した後穴を生じるのであるが、その際の塑性変形の程度は、コロージョンによる表面あれ増大のため、当然純エロージョンの場合より小さなものとなる。

穴も多数生じている(c),(d)期間では、純エロージョンの場合と同様(a),(b)期間に比べて損傷を生じやすくなるが、これにコロージョンが加わるため、さらに一層損傷は脆性的なものとなり、Fig. 5-8の硬度分布の結果に見られるようにほとんど塑性変形を伴わずに損傷を生ずる。

このように、磁歪振動法におけるコロージョンの効

果としては、従来からよく言われていた^{82), 83)}、キャビテーションにより腐食生成物を除去しつねに新しい面を露出させるという作用よりも、むしろ腐食によりピットも生じそれによつて損傷もより脆性的なものにするといった、材料表面を劣化させる効果の方が大きいものと考えられる。

以上で磁歪振動法における損傷機構を明らかにしたが、これを実際の装置・機械の損傷条件に比較的近いウォータートンネル法における損傷機構^{*)}と比較してみる。

Fig. 7-2 に磁歪振動法による4種の材料の損傷断面の金属顕微鏡写真を示すが、いずれも表面に鋭いクラックが認められ、損傷がかなり脆性的な機構で生じたことがうかがえる。一方、ウォータートンネル法における同様の写真を Fig. B (付録) に示す。各材料ともその損傷面は比較的平坦で、とくに軟鋼では塑性変形による結晶粒の流れが見られ、磁歪振動法に比べてその損傷機構はかなり延性的であると言える。このように写真で見られる両法の損傷機構の違いは、主として両者における衝撃圧の大きさおよびくり返し数の違いによるものと考えられる。すなわち、磁歪振動法ではウォータートンネル法に比べて、より大きな衝撃圧が、単

*) 詳細は「付録」参照

位時間内により多数回生じている、つまり、より高速で負荷を生じているためである。

一般に材料は、作用する応力あるいはひずみ速度が大きく、また温度が低いほど脆性的な破壊を示し、逆に、応力、ひずみ速度が小さく、温度が高いほど延性的なものとなる。したがって、磁歪振動法においても、衝撃圧が小さく（すなわち低振幅）、また温度の高い条件下で試験を行なうことにより、ウォータートンネル法における損傷機構に近づけることができると考えられる。また逆に、ウォータートンネル法においても、何らかの方法で衝撃圧を大きくし、さらにできるだけ低温で試験を行なうことにより、磁歪振動法における損傷機構に近づけることができる。このことは、Fig. 4-2, Fig. 4-3, Fig. C (付録) の硬度分布測定の結果を見れば明らかである。

7.3 結 論

本章では、前章までの結果を総合的に検討し、損傷速度の経時変化と対応させながら、磁歪振動法におけるキャビテーション損傷機構を明らかにした。またそれとウォータートンネル法における損傷機構と比較検討し、つぎの結論を得た。すなわち、

- 1) 磁歪振動における損傷機構はつぎの通りである。まず材料はキャビテーション衝撃圧により塑性変形を生じ、しだいに進行するとともにひずみ硬化する。塑性変形がある程度以上になると穴を生じ始める。一旦穴を生じると切欠効果により穴を中心に損傷を生ずる。さらに時間が経過し、穴の数および大きさがある程度以上になると、気泡は個々の穴にとじ込められた状態で発生・消滅をくり返すため衝撃圧が小さくなり、損傷速度はしだいに減少する。
- 2) コロージョンが加わると、コロージョンにより材料表面が劣化されるため、損傷は一層脆性的なものとなる。
- 3) 磁歪振動法における損傷とウォータートンネル法におけるそれとを比較すると、明らかに機構を異にし、ウォータートンネル法では、より延性的な損傷機構を示す。

しかし、磁歪振動法において、振幅、振動数、

温度などの条件を適当に選ぶことにより、ウォータートンネル法における損傷機構にある程度近づけ得ることも指摘した。

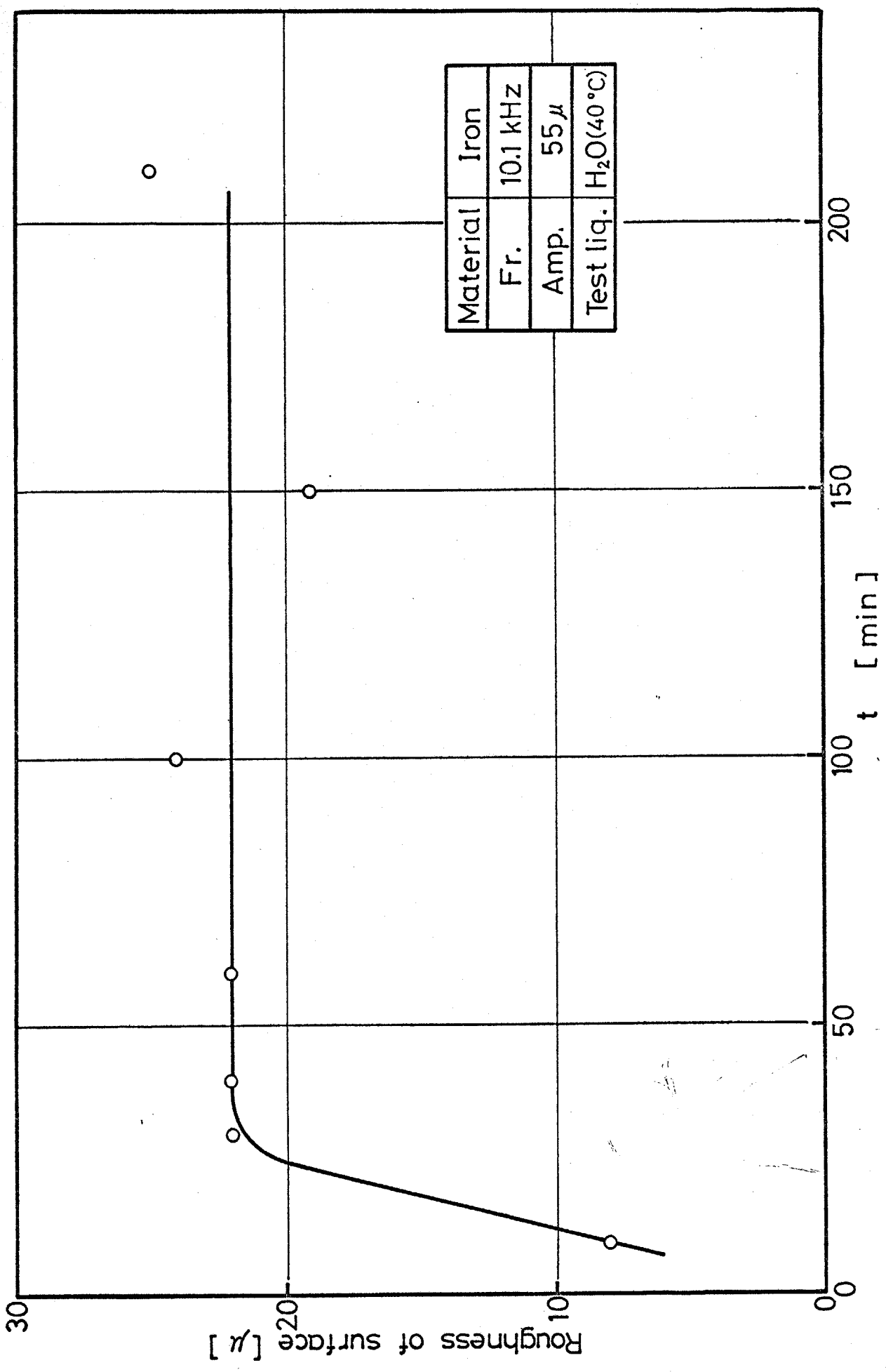
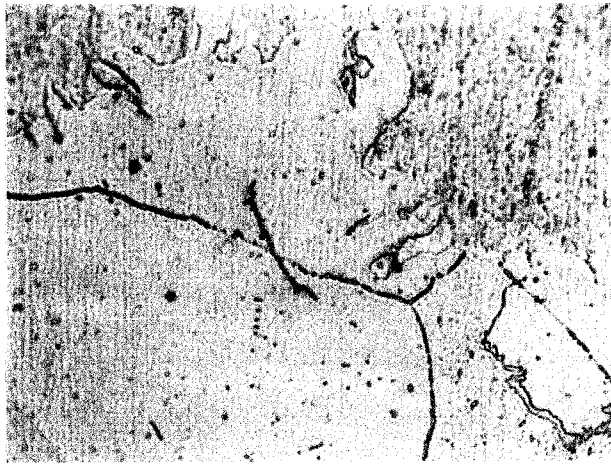
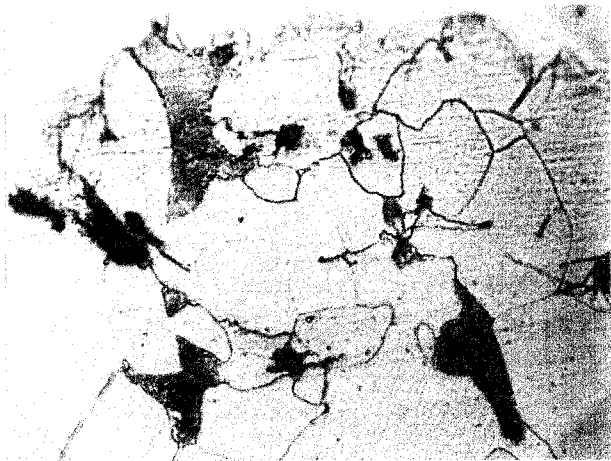


Fig. 7-1 Effect of test duration on surface roughness for the iron specimen



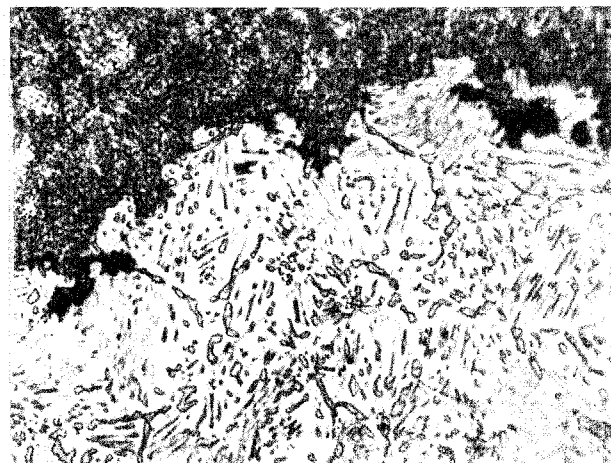
20 μ

Iron
t=150 min
(x 650)



20 μ

Hypoeutectoid steel
t=180 min
(x 650)



20 μ

Hypereutectoid steel
t=1020 min
(x 650)



20 μ

Cast iron
t=200 min
(x 650)

Fig. 7-2 Photomicrographs of cavitation damage in magnetostrictive apparatus (10 kHz, 55 μ , 40°C)

第 8 章 総 括

本章では、前章までに得られた結果の総括を行ない、あわせて、今後の問題点を指摘する。

第 1 章では、キャビテーションに関する既往の研究について検討し問題点を指摘した。研究方針として、磁歪振動法におけるキャビテーション損傷機構を解明するために、実際の装置・機械で重要な問題となっているコロージョンの影響も含めて、損傷速度に影響を与えると考えられる種々の因子に注目し、各々の効果を明らかにするとともに損傷機構の解明を目的とした。

第 2 章では、本論文で用いた磁歪振動法キャビテーション試験装置および試験材料について述べた。

第 3 章では、磁歪振動法において特徴的に見られる損傷速度の経時変化に着目し、その原因について検討した。その結果、磁歪振動法において損傷速度が経時的に変化するものは、試験片表面の損傷状態が時間的に四つの期間に分けられることから、時間とともに四種の損傷機構が継起するためであることを明らかにした。また、損傷断面の硬度分布測定の結果から、損傷に先行して塑性変形を伴うことを明らかにした。

第 4 章では、損傷に及ぼす液温、振幅、振動数の影

響について検討した。その結果、温度が低いほど、また振幅が大きいほど損傷はより脆性的な機構で生ずることも明らかにした。また振動数の影響については、気泡挙動の違いにより、とくに 20kHz において他と異なる現象が見られる点を指摘した。

第5章では、損傷に及ぼすコロージョンの影響について検討した。その結果、エロージョンとコロージョンを同時に生じている場合の損傷量と pH の関係は、コロージョンのみの場合のそれに類似していることから、コロージョンの影響がかなり大きいことも明らかにした。コロージョンの pH に対する挙動について、とくに pH 2 から 1 で腐食量が減少する傾向にある原因については、 Cl^- の吸着によるためであることを明らかにした。

また、エロージョンとコロージョンの相互作用を表わす設計上有用な式を提出した。これにより、コロージョン環境下におけるキャビテーション損傷量の推定が十分可能となった。

第6章では、試験片直径の影響について検討した結果、損傷領域に注目すると、この単位面積当りの平均損傷速度は直径に無関係に一定であることを明らかにした。さらに、これらの結果から、損傷速度と振幅、振動数、試験片直径との関係を明らかにし、種々の実験条件下でのデータも、ある標準の実験条件の場合に

変換して比較できることを示した。

第7章では、第3章～第5章までの結果を総合的に検討し、磁歪振動法における材料の損傷機構について論じた。

なお、今後に残された問題点として、つぎのような点が挙げられる。

- 1) 第3章において、Fig. 3-2に見られるように、材料によつて損傷速度の経時変化の様子が異なっている。すなわち、鉄のような鋭いピークは見られず平坦なもの、あるいはピークが二つ現われるものもある。そしてこのような挙動を示す材料が耐キャビテーション性に優れている傾向にあることから、この原因を明らかにすることが重要となる。この点に関しては、すでに簡単な報告⁸⁴⁾をしてあるが、さらに十分な検討が必要である。
- 2) 第4章においては、温度の影響に関して、とくに気泡の挙動に注目した詳細な研究が必要である。これには、溶解ガスの影響、静圧の影響あるいは気泡の種類(ガス、蒸気)に対する考察、などが問題となり、さらに温度範囲を大巾に変えた実験も必要となる。
- 3) 第5章では、エロージョンとコロージョンの相互

- 作用を一層明らかにするために、両者と完全に分離した実験が必要となる。また(5-3)式のような加算的な式も仮定したが、実際は陰函数の型になるべきであり、この点に関してもしっかり検討すべきである。
- 4) 第6章においては、損傷領域にのみ注目して検討したが、気泡群の挙動との関連についても明らかにすべきである。
- 5) 本論文では、ほとんど標準の試験材料として鉄を用いて検討したが、他の材料についても同様な実験を行ない、損傷と材料特性との比較などから、一層普遍的な損傷機構を明らかにすべきと考える。

謝 辞

本研究を行なうにあたり、終始おわらぬ熱意ともって御指導下さいました名誉教授末沢慶忠先生並びに助教授北條寛光先生に深く感謝いたします。

研究および論文の作成に際しまして御指導下さいました、伊藤四郎教授、慶伊富長教授、高島洋一教授、春山志郎助教授の各先生に深く感謝いたします。

また、研究中有益な御助言を頂きました、森栄司教授並びに化学工学科の諸先生がたに厚くお礼申し上げます。

さらに、実験を行なうにあたり、いろいろと御協力下さいました研究室の皆様並びに卒論学生諸君に厚くお礼申し上げます。

最後に、装置組立等に便宜をお計り下さいました東陽理工(有)に謝意を表します。

Nomenclature

A ; double amplitude of vibration of test specimen	[μ]
a ; area of eroded hole	[mm^2]
c ; sound velocity in liquid	[m/sec]
D ; diameter of test specimen	[mm]
d ; diameter of eroded area	[mm]
E ; energy radiated from the surface of specimen corresponding to eroded area	[erg/sec]
F ; dissolved quantity of iron	[mg]
f ; frequency of oscillation	[1/sec]
H _v ; Vickers Hardness number	
I ; energy flux radiated from specimen	[erg/cm ² sec]
N ; number of eroded hole	
R ; rate of weight loss	[mg/min]
t ; testing time	[sec]
W ; weight loss of test specimen	[mg]
W _c ; weight loss by corrosion	[mg]
W _e ; weight loss by cavitation erosion	[mg]
W _{ce} ; weight loss by mutual action of corrosion and erosion	[mg]
ρ ; density of liquid	[g/cm ³]

Literature cited

- 1) J.C. Hunsaker, "Cavitation Research", Mech. Engng., 67, 211 (1935)
- 2) 沼知, "キャビテーション発生機構に関する一寄与", 日本機械学会論文集, 3, 177 (1937)
- 3) R.T. Knapp, "Cavitation and Nuclei", Trans. ASME, 80, 1315 (1958)
- 4) J.W. Holl, "Nuclei and Cavitation", Trans. ASME, Ser.D, 92, 681 (1970)
- 5) H.N.V. Temperley, "The Behaviour of Water under Hydrostatic Tension", Proc. Phy. Soc., 59, 199 (1947)
- 6) L.J. Briggs, "Limiting Negative Pressure of Water", J. Appl. Phys., 21, 721 (1950)
- 7) 末沢, 松村, "キャビテーション・エロージョンに関する研究", 化学工学, 31, 177 (1967)
- 8) R.T. Knapp, "Recent Investigation of the Mechanics of Cavitation and Cavitation Damage", Trans. ASME, 77, 1045 (1955)
- 9) S. Kamiyama, "Cavitation Test in Pipe Bends", Trans. ASME, Ser.D, 88, 252 (1966)
- 10) F.G. Hammitt, L.L. Barinka, et al., "Initial Phases of Damage to Test Specimens in a Cavitation Venturi", Trans. ASME, Ser.D, 87, 453 (1965)
- 11) G.M. Wood, L.K. Knudsen and F.G. Hammitt, "Cavitation Damage Studies with Rotating Disk in Water", Trans. ASME, Ser.D, 89, 98 (1967)
- 12) J.Z. Lichtman & E.R. Weingram, "The Use of a Rotating Disk Apparatus in Determining Cavitation Erosion Resistance of Materials", ASME Symposium on Cavitation Research Facilities and Technique, New York, 185 (1964)
- 13) A. Thiruvengadam, "A Comparative Evaluation of Cavitation Damage Test Devices", ASME Symposium on Cavitation Research Facilities and Technique, New York, 157 (1964)
- 14) 遠藤, 石原, 沢田, "酸性河水を使用する水力発電所における腐食並びに防食", 日本金属学会誌, 15, 491 (1951)
- 15) H.S. Preiser and B.H. Tytell, "The Electrochemical Approach to Cavitation Damage and its Prevention", Corrosion, 17, 535 (1961)
- 16) J.C. Hunsaker, "Progress Report on Cavitation Research at Massachusetts Institute of Technology", Trans. ASME, 57, 423 (1935)
- 17) S.L. Keer, "Determination of the Relative Resistance to Cavitation Erosion by the Vibratory Method", Trans. ASME, 59, 373 (1937)
- 18) M. Kornfeld & L. Suvorov, "On the Destructive Action of Cavitation", J. Appl. Phys., 15, 495 (1944)

- 19) W.J. Rheingans, "Accelerated-Cavitation Reseach", Trans. ASME, 72, 705 (1950)
- 20) W.C. Leith & A.L. Thompson, "Some Corrosion Effects in Accelerated Cavitation Damage", Trans. ASME, Ser.D, 82, 795 (1960)
- 21) A. Thiruvengadam & H.S. Preiser, "On Testing Materials for Cavitation Damage Resistance", J. Ship Reseach, 8, 39 (1964)
- 22) 藤間, "Fixed Type Cavitationによる金属の損傷", 日立評論, 31 123 (昭39)
- 23) M.S. Plesset & R.E. Devine, "Effect of Exposure Time on Cavitation Damage", Trans. ASME, Ser.D, 88, 691 (1966)
- 24) J.M. Hobbs, "Experience with a 20-kc Cavitation Erosion Test", Erosion by Cavitation or Impingement, ASTM Stp. No 408, 159 (1966)
- 25) H. Rieger, "Über die Zerstörung von Metallen durch Kavitation am Schwinggerät", Z. Metallkde., 58, 821 (1967)
- 26) 広津安部, "石炭歪振動法によるキャビテーションかき食について", 日本機械学会誌, 70, 191 (昭42)
- 27) H. Wiegand & R. Schulmeister, "Untersuchungen am Schwinggerät über den Einflug von Frequenz, Amplitude, Druck und Temperature auf die Werkstoffzerstörung durch Kavitation", MTZ, 29, No 2, 41 (1968)
- 28) R. Garcia & F.G. Hammitt, "Cavitation Damage and Correlations with Materials and Fluid Properties", Trans. ASME, Ser.D, 89, 753 (1967)
- 29) F.G. Hammitt, C. Chao, et al., "ASTM Round Robin Test with Vibratory Cavitation and Liquid Impact Facilities of 6061 T6511 Aluminium Alloy, 316 Stainless Steel, and Commercially Pure Nickel", Materials and Standards, 10, No 10, 16 (1970)
- 30) L.E. Robinson, B.A. Holmes & W.C. Leith, "Progress Report on Standardization of the Vibratory Cavitation Test", Trans. ASME, 80, 103 (1958)
- 31) M.S. Plesset & A.T. Ellis, "On the Mechanism of Cavitation Damage", Trans. ASME, 77, 1055 (1955)
- 32) R. Canavelis, "Jet Impact and Cavitation Damage", Trans. ASME, Ser.D, 90, 355 (1968)
- 33) O.G. Engel, "Impact of Liquid Drops", Symposium on Erosion and Cavitation", ASTM Stp. No 307, 3 (1961)
- 34) F.P. Bowden and J.H. Brunton, "The Deformation of Solids by Liquid Impact at Supersonic Speeds", Proc. Roy. Soc., Ser.A, 263, 433 (1961)
- 35) J.F. Ripken, "Comparative Studies of Drop Impingement Erosion and Cavitation Erosion", Univ. of Minnesota St. Anthony Falls Lab., Project Rep. No 105 (1969)
- 36) M.s. Plesset, "On cathodic Protection in Cavitation damage", Trans. ASME, Ser.D, 82, 808 (1960)

- 37) S.Waring, H.S. Preiser & A. Thiruvengadam, "On the Role of Corrosion in Cavitation Damage", J. Ship Research, 2, 200 (1965)
- 38) A. Thiruvengadam & S. Waring, "Mechanical Properties of Metals and their Cavitation Damage Resistance", J. Ship Research, 10, 1 (1966)
- 39) Lord Rayleigh, "On the Pressure Developed in a Liquid During the Collapse of a Spherical Cavity", Phil. Mag., 34, 94 (1917)
- 40) M.S. Plesset, "Shockwaves from Cavity Collapse", Phil. Trans. Roy. Soc., Ser.A, 260, 241 (1966)
- 41) M.S. Plesset & R.B. Chapman, "Collapse of an Initially Spherical Vapour Cavity in the Neighbourhood of a Solid Boundary", J. Fluid Mech., 47, 283 (1971)
- 42) C.F. Naude & A.T. Ellis, "On the Mechanism of Cavitation Damage by Nonhemispherical Cavities collapsing in Contact with a Solid Boundary", Trans. ASME, Ser.D, 83, 648 (1961)
- 43) T.B. Benjamin and A.T. Ellis, "The Collapse of Cavitating Bubbles and the Pressures thereby Produced against Solid Boundary", Phil. Trans. Roy. Soc., Ser.A, 260, 221 (1966)
- 44) R.D. Ivany & F.G. Hammitt, "Cavitation Bubble Collapse in Viscous, Compressible Liquids---Numerical Analysis", Trans. ASME, Ser.D, 87, 977 (1965)
- 45) M.S. Plesset, "Cavitation Erosion in Nonaqueous Liquids", Trans. ASME, Ser.D, 92, 807 (1970)
- 46) B.W. Hansen & R.E.H. Rasmussen, "Cavitation Damage Experiments in a Rotating Disk Apparatus especially with regard to the Gas Content of Water", J. Ship Research, 12, 83 (1968)
- 47) H.N. Boetcher, "Failure of Metals due to Cavitation under Experimental Conditions", Trans. ASME, 58, 355 (1936)
- 48) A. Thiruvengadam, "A Unified Theory of Cavitation Damage", Trans. ASME Ser.D, 85, 365 (1963)
- 49) W.H. Wheeler, "Mechanism of Cavitation Erosion", Cavitation in Hydrodynamics (N.P.L., London) (1956)
- 50) 岡本.入江 S, "キャビテーション腐食に対する陰極防食法の効果", 防食技術, 3, 230 (1954)
- 51) 加藤, "発電用水車に生じるキャビテーション・エロージョン", 電気化学, 27, 535 (1959)
- 52) W.H. Wheeler, "Indentation of Metals by Cavitation", Trans. ASME, Ser.D, 82, 184 (1960)
- 53) W. Li, "Thermal Effect on the Growth and Collapse of Cavities", Proceeding of IAHR Symposium, Sendai, Japan, 1 (1962)
- 54) J.Z. Lichtman, D.H. Kallas, C.K. Chatten, et al., "Study of Corrosion and Cavitation Erosion Damage", Trans. ASME, 80, 1325 (1958)

- 55) 末沢.松村.津田, "球表面におけるキャビテーション衝撃圧の発生機構", 化学工学, 32, 452 (1968)
- 56) 末沢.松村, "ウォータートンネル法による鋼球のキャビテーション侵食", 化学工学, 32, 455 (1968)
- 57) 末沢.松村.津田, "金属のキャビテーション・エロージョン機構", 材料科学, 6, No 2, 86 (1969)
- 58) Y. Suezawa, M. Matsumura, K. Nakajima & K. Tsuda, "Studies on Cavitation Erosion", Trans. ASME. Ser.D, under printing.
- 59) S.D. Hawkins, "Solid Erosion in Low-Amplitude Sound Field", J. Acoust. Soc. Am., 39, 55 (1966)
- 60) F.J. Heymann, "On the Time Dependence of the Rate of Erosion due to Impingement or Cavitation", Erosion by Cavitation or Impingement, ASTM Stp. No 408, 70 (1966)
- 61) A. Thiruvengadam, "On Modeling Cavitation Damage", J. Ship Research, 13, 220 (1969)
- 62) F.G. Hammitt & D.O. Rogers, "Effects of Pressure and Temperature Variation in Vibratory Cavitation Damage Test", J. Mech. Eng. Sci., 12, 432 (1970)
- 63) F.D. Smith, "On the Destructive Mechanical Effects of the Gas-bubbles liberated by the Passage of Intence Sound through a Liquid"; Phil. Mag., 19, 1147 (1935)
- 64) Hueter & Bolt, "Sonics" (Jhon & Wiley), 54 (1955)
- 65) 末沢, "酸性流動液による鋼の腐食", 化学工学, 27, 694 (1963)
- 66) G.W. Whitman, R.P. Russell & V.J. Altieri, "Effect of Hydrogen-Ion Concentration on the Submerged Corrosion of Steel", Ind. Eng. Chem., 16, 665 (1924)
- 67) H.O. Forrest, B.E. Roetheli & R.H. Brown, "Products of Corrosion of Steel", Ind. Eng. Chem., 23, 650 (1931)
- 68) W.J. Lorenz, H. Yamaoka & H. Fischer, "Zum Electrochemischen Verhalten des Eisens in Salzsauren Lösungen", Ber. Bunsen. Ges. Phys. Chem., 67, 932 (1963)
- 69) W.J. Lorenz, "Der Einfluss von Halogenidionen auf die Anodische Auflösung des Eisens", Corrosion Sci., 5, 121 (1965)
- 70) M. Stern, "The Electrochemical Behavior, Including Hydrogen Over-voltage, of Iron in Acid Environments", J. Electrochem. Soc., 102, 609 (1955)
- 71) K. Schwabe, "Neuere Erkenntnisse zur Passivität der Metalle", Werkstoffe und Korr., 15, 70 (1964)
- 72) Y. Chiu & M.A. Genshaw, "Study of Anion Adsorption on Platinum by Ellipsometry", J. Phys. Chem., 73, 3571 (1969)

- 73) W. Paik, M.A. Genshaw & J.O.M. Bockris, "The Adsorption of Anions at the Solid-Solution Interface", J. Phys. Chem., 74, 4266 (1970)
- 74) 佐々木, 泉, 大橋 S, "白金電極への陰イオン吸着測定", 日本化学雑誌, 87, 918 (1966)
- 75) P.V. Popat & N. Hackerman, "Capacity of the Electrical double Layer and Adsorption at Polarized Platinum Electrodes", J. Phys. Chem., 62, 1198 (1958)
- 76) T. Murakawa & N. Hackerman, "The double Layer Capacity at the Interface between Iron and Acid Solution", Corrosion Sci., 4, 387 (1964)
- 77) 村川, 加藤, "鉄-酸水溶液界面のイオン吸着と電位-微分容量曲線", 金属表面技術, 17, 432 (1966)
- 78) I.L. Rosenfeld & W.P. Maximtshuk, "Über den passiven Zustand der nichtrostenden Legierungen in Gegenwart von Chlorionen", Z. Physik. Chem., (Leipzig), 215, 25 (1960)
- 79) K.E. Heusler & G.H. Cartledge, "The Influence of Iodide Ion and Carbon Monoxide on the Anodic Dissolution of Active Iron", J. Electrochem. Soc., 108, 732 (1961)
- 80) J.E. Davies, "The Determination of Chloride on Ruster Steel Panels", J. Oil Col. Chem. Assoc., 54, 281 (1971)
- 81) 定志, 菊池, 超音波技術便覧 (日刊工業新聞社), p16 (1960)
- 82) H.R. Copson, "Effect of velocity on Corrosion", Corrosion, 16, 86t (1960)
- 83) S.L. Kerr, "Cavitation Erosion", Corrosion Handbook, H.H. Uhlig, 597 (1948)
- 84) M. Matsumura, Y. Suezawa & K. Tsuda, "On the Time Dependence of the Rate of Erosion", Polyphse Flow Forum, ASME, 16 (1972)

(付録) ウォータートンネル法におけるキャビテーション損傷^{55)~58)}

実際の装置・機械に比較的近い状態でキャビテーション損傷実験を行なうため、いわゆるウォータートンネル法を採用した。この装置における気泡群の挙動、衝撃圧の発生機構などに関しては、松村氏の博士論文^{*)}ですでに明らかにされている。

ここでは、磁歪振動法と比較するために、ウォータートンネル法におけるキャビテーション損傷機構について簡単に述べる。

実験装置は、Fig. A に示すようなもので、内径 52.9 ϕ の円管の中心部に球を固定し、そのまわりに高速流体を流し、球の表面にキャビテーション損傷を与えるものである。

流速を徐々に増して行くと、球径 22.22 ϕ の場合には、約 10 m/sec (空管基準のレイノルズ数にして約 8.13×10^5) 程度になると球表面から気泡が発生し始める。その後流速が増すと、気泡の数が増し、球を帯状にとりまく。さらに流速を増すと、気泡の長さが増大して球の後半部全域を覆うようになる。高速度カメラあるいはストロボによる詳細な観察の結果、気泡群の挙動によ

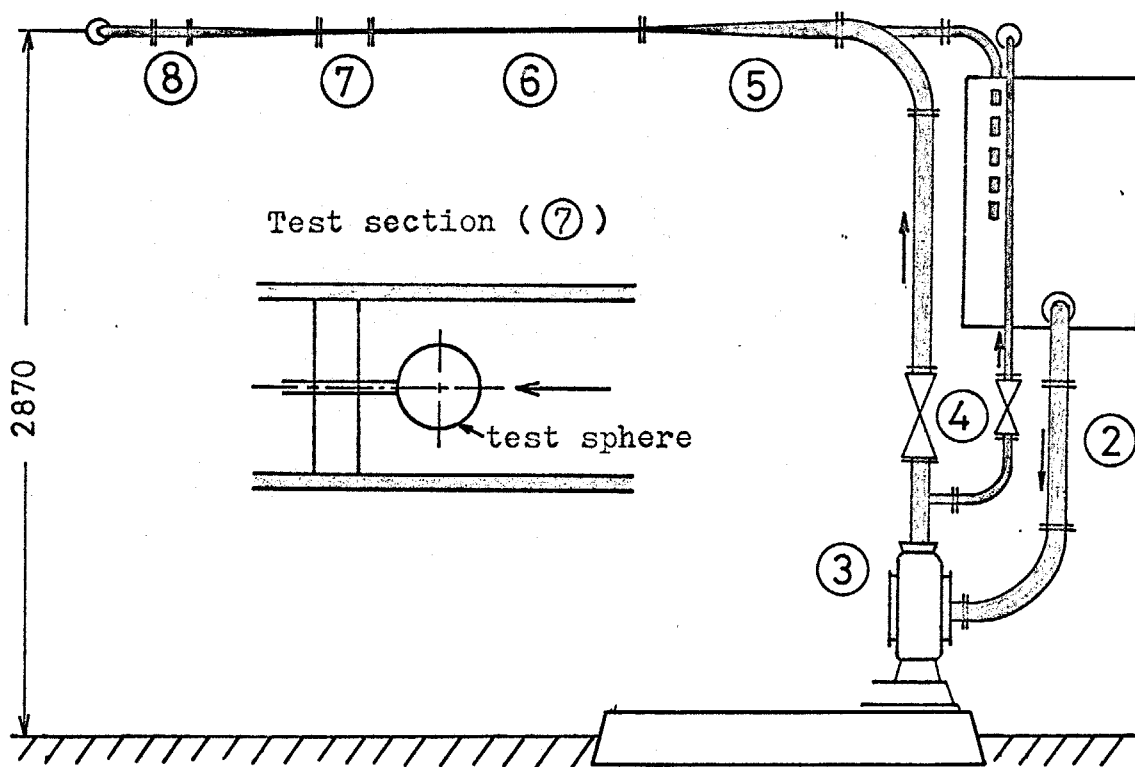
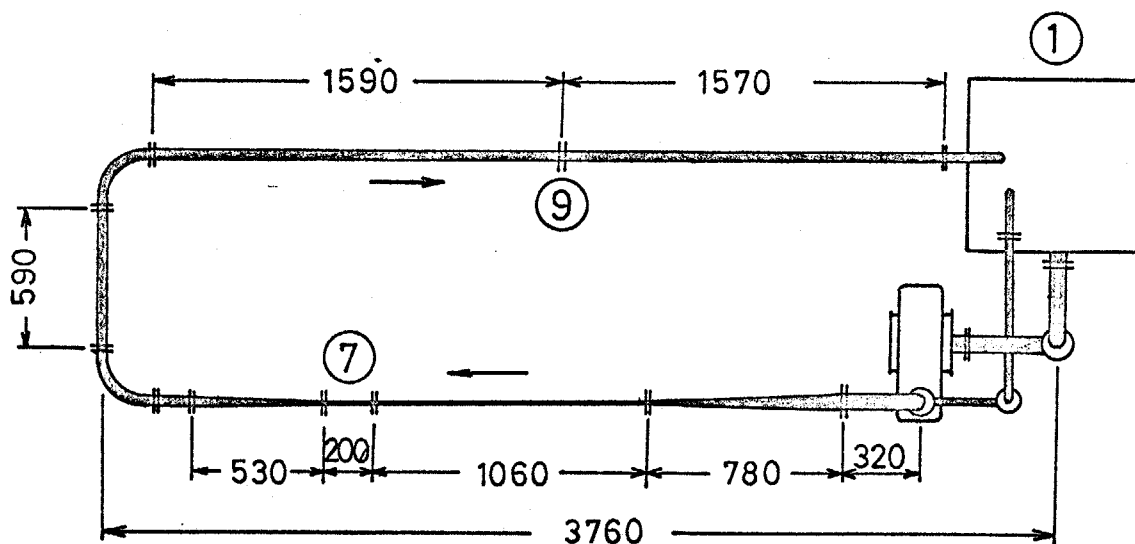
*) 松村, 博士論文(キャビテーション・エロージョンに関する研究) (1967)

り三つの流速域に分けることができた。すなわち、比較的流速域(流速 $\bar{u} < 13 \text{ m/sec}$)では気泡は球の表面の任意の場所から発生し流れ去って行く。(A)流速域)。少し流速が増すと ($13 < \bar{u} < 14 \text{ m/sec}$)、気泡は一つの気泡群として球を環状にとりまいて発生し、そのままの形で下流に流れ去るといふ周期運動を行なう (B)流速域)。この周期運動の周波数は、球径によって異なるが $d=22.22 \phi$ では約 330 サイクル/sec である。さらに流速が増すと ($14 \text{ m/sec} < \bar{u}$)、球の後半部全体が常に気泡で覆われている状態になる (C)流速域)。

以上三つの流速域においてそれぞれ水損傷実験を行なった結果、気泡群が周期的な挙動を示す (B)流速域において損傷速度が最大となった。そこで、この (B)流速域 (流速約 13.5 m/sec , $Re = 1.10 \times 10^6$) で、液温 40°C のもとで損傷実験を行なった。各材料の損傷断面の金属顕微鏡写真と Fig. B に示すが、第7章でも述べたように、各材料とも磁歪振動法における場合 (Fig. 7-2) に比べて、損傷面は比較的平坦である。またとくに、軟鋼においては表面近傍の結晶粒が変形して流れているのが認められる。

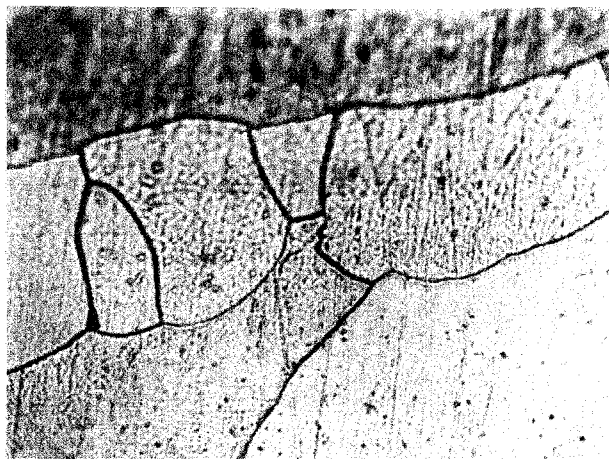
つぎに、Fig. C に鉄の損傷断面の硬度分布の測定結果を示す。損傷面近くにおいて硬度の上昇が見られるが、これは Fig. B で認められた結晶粒の流れから考えて、塑性変形によるひずみ硬化の結果と考えられる。

また、この硬度上昇の割合は、磁歪振動法の場合 (Fig. 4-2) に比してかなり大きいことから、ウォータートンネル法では、磁歪振動法の場合より、かなり大きな塑性変形の後には損傷を起す。すなわち、より延性的な機構で損傷を生じていることがわかる。これは、両法における衝撃圧の大きさおよびくり返し数の差によるものと思われる。



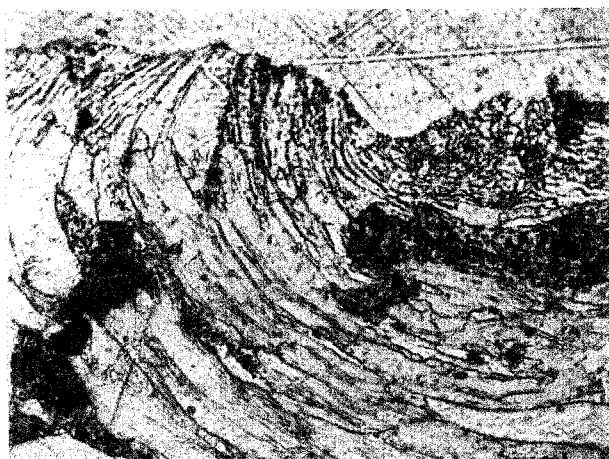
1	Tank	4	Valve	7	Test section (2"φ)
2	Suction pipe(5")	5	Reducer(5"φ x 2"φ)	8	Diffuser(2"φ x 3"φ)
3	Pump	6	Settling section	9	Orifice meter

Fig. A Schematic diagram of water tunnel apparatus



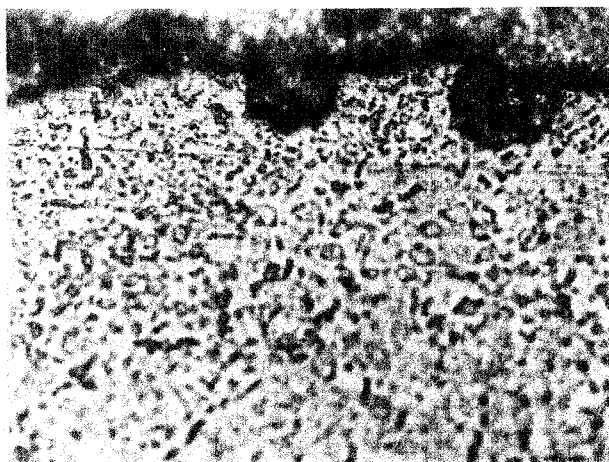
20 μ

Iron
t=150 min
(x 650)



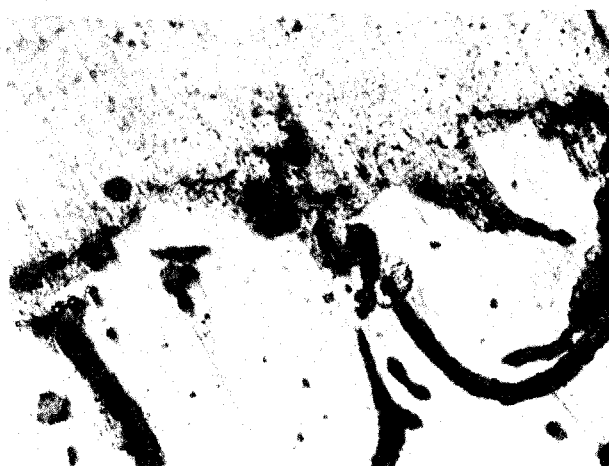
20 μ

Hypoeutectoid steel
t=155 min
(x 650)



20 μ

Hypereutectoid steel
t=150 min
(x 650)



20 μ

Cast iron
t=150 min
(x 650)

Fig. B Photomicrographs of cavitation damage in water tunnel apparatus (40°C)

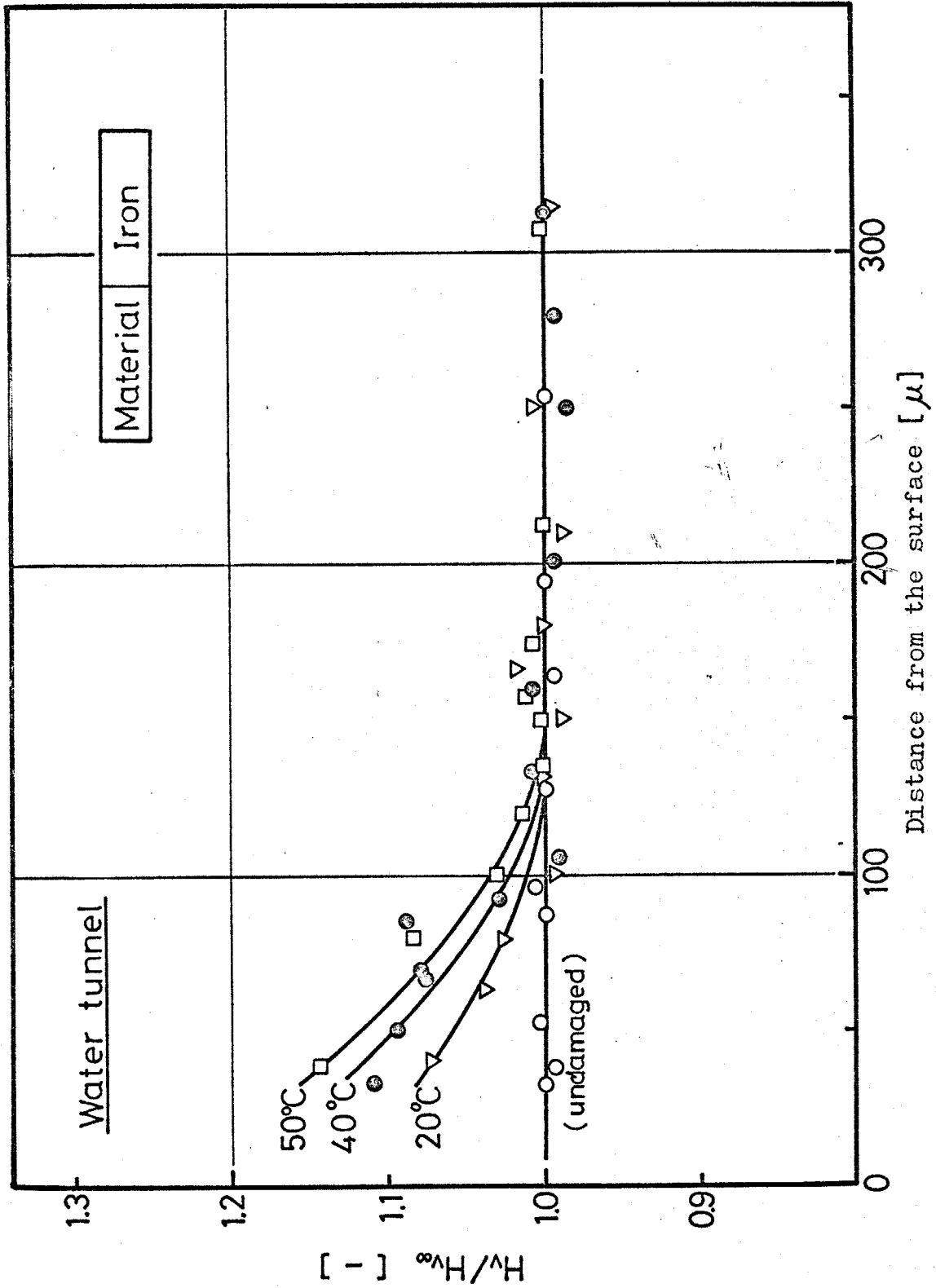


Fig. C Hardness distribution of damaged specimen in water tunnel apparatus