

マレブルのひずみ取り作業に関する基礎的実験

Fundamental Experiments on Straightening of Malleable Iron Castings

佐田 応 男*
Masao Sada

内 容 梗 概

マレブル鋳物 (FCMB 32) は焼鈍の際変形するため、ひずみの矯正作業を行わなければならない。このひずみ取り作業を行う場合の変形抵抗に及ぼす変形速度、温度および形状などの影響を究明するとともに、塑性変形後の機械的性質の変化を調査した。塑性変形により機械的性質は著しく変化することが判明したので、マレブルの特性を阻害しない程度にひずみ取り矯正を行う限界を見出すことができた。

1 緒 言

マレブルは白銹中のセメントタイトを長時間の焼鈍により分解してつくられる。したがって焼鈍の際に変形する。その変形を出炉後、フリクションプレスあるいは水圧プレスにより矯正し、正常の形にととのえる。この矯正ひずみ取り作業時の材料の変形抵抗は変形速度、温度および形状により影響され、またひずみ取り後塑性変形により機械的性質は変化する。これらのひずみ取り作業に関連する圧縮変形、曲げ変形および塑性変形による機械的性質の変化を調査するため以下の実験を行った。

2. 圧縮変形について^{(1)(4)~(8)}

2.1 変形抵抗

変形抵抗とは材料が一軸応力の下に変形する場合の抵抗であって、圧縮変形過程における変形抵抗は材料固有の性質のほか次のような要因によって左右される。すなわち(1)圧縮面の摩擦による付加応力(2)被圧縮材の形状(3)変形速度などであるが、本実験では変形速度は静的な場合と衝撃的な場合に分けた。

圧縮面の摩擦については、試験片の摩擦面に黒鉛グリースを塗布し、摩擦抵抗を少なくした。形状は円柱形試験片とし、径と高さの比を変えて試験を行った。実験を行った温度は 3~1,000°C の範囲である。

2.2 実験方法

2.2.1 静的圧縮変形

第1図に示すように、アムスラ形万能試験機を使用して圧縮変形量と荷重を測定し、静的荷重(PS)と変形量(u)との関係を求めた。

2.2.2 衝撃圧縮変形

本実験では、第2図に示すような自由落槌式衝撃圧縮試験機(第1表)にて落槌の落下エネルギー(GH)と変形量(u)の関係を求めて $GH-u$ 曲線を変形量(u)について微分し、 u における衝撃変形荷重(Pd)を求めた。

$$Pd = \frac{dGH}{du} \dots\dots\dots (1)$$

ただし

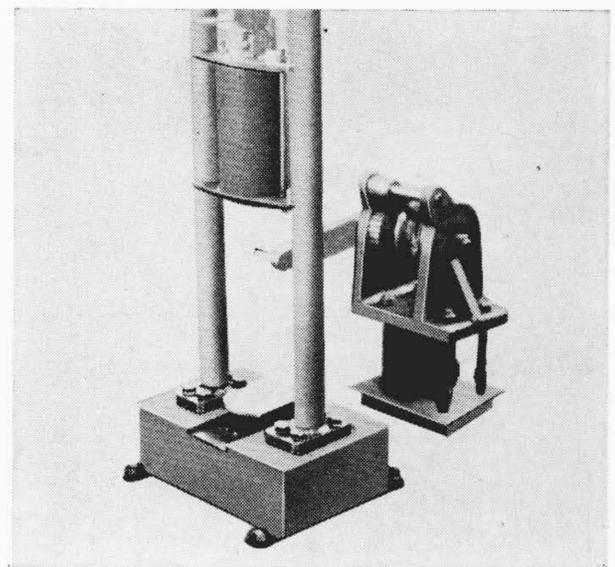
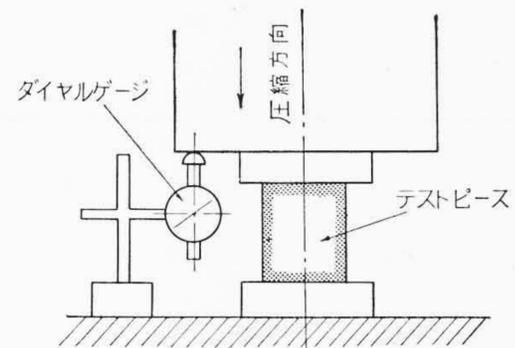
Pd : 衝撃圧縮変形抵抗 (kg)

u : 変形量 (mm)

GH : 落槌のエネルギー (kg-mm)

高温試験の場合は、次の(2)式により平均変形抵抗を求めた。

$$Kf = \frac{GH}{V \log e \frac{h_0}{h_1}} \text{ (kg/mm}^2\text{)} \dots\dots\dots (2)$$



第1表 試験機の能力

ハンマ重量	最高落差	最高エネルギー	最高瞬間速度
G (kg)	H (m)	GH (kg-m)	Vo (m/s)
7.2	1.8	12.9	5.76
14.5	1.8	26.1	5.76
22.0	1.7	37.4	5.60

ただし

Kf : 平均変形抵抗 (kg/mm²)

GH : 落下エネルギー (kg-mm)

V : 試験片の体積 (mm³)

h_0 : 変形前の高さ (mm)

h_1 : 変形後の高さ (mm)

圧縮変形後の形状を第3図に示す。

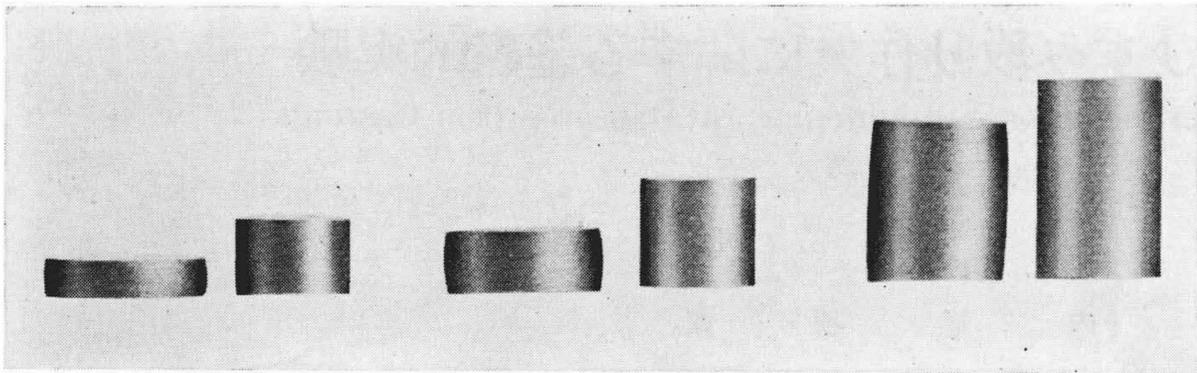
2.2.3 供試材料

材質は FCMB 32 であり、25φ×200 の粗材丸棒を鋳造し標準熱処理を施してつくった。その機械的性質は第2表のとおりである。粗材より第3表に示す高さを異にする3種の円柱試験片をつくった。

2.2.4 加熱方法

マッフル形電気抵抗炉にて、所定の温度に15分間保持したのち

* 日立金属工業株式会社戸畑工場



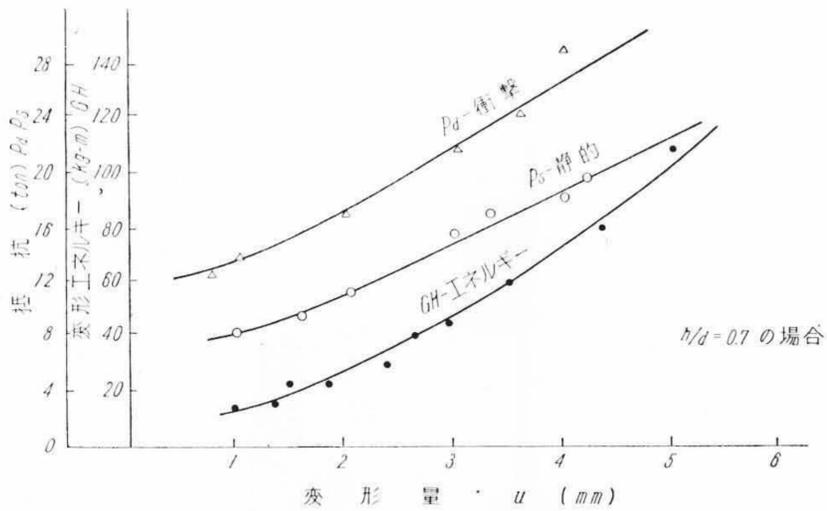
(左側は圧縮したもの)
第3図 圧縮試験片

第2表 試料の機械的性質

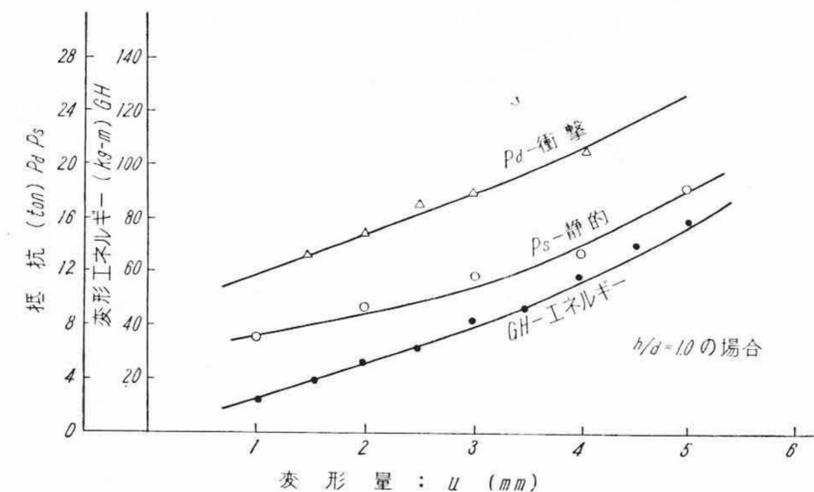
材質	抗張力(kg/mm ²)	伸び (%)	硬度(HB)
FCMB 32	34~39	10~19	110~145

第3表 試験片の寸法 (mm)

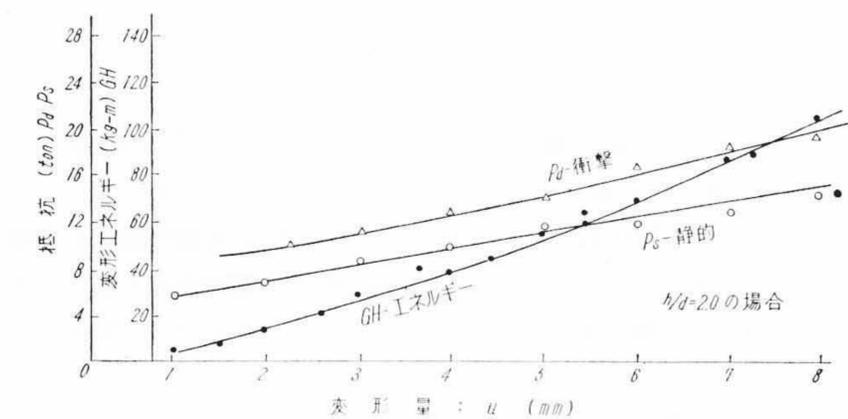
番号	直径 d	高さ h	h/d
1	15	10	0.7
2	15	15	1.0
3	15	30	2.0



GH-u-Pd-Ps線図
第4図 変形抵抗



GH-u-Pd-Ps線図
第5図 変形抵抗



GH-u-Pd-Ps線図
第6図 変形抵抗

に取り出して圧縮した。その操作時間は約3秒間であり、この間の温度降下はわずかである。3°Cの場合は水中に氷塊を入れて3°Cに保ち、その中に20分間浸した。この場合も操作による温度上昇はわずかである。実験を行った際の室温は20~30°Cであった。

2.3 実験結果と検討

2.3.1 常温の場合の変形抵抗

各形状の試験片について2.2.1で求めた静的変形抵抗 P_s と2.2.2で求めた衝撃変形抵抗 P_d をそのまま比較して第4~6図に示す。室温は20~27°Cであった。変形量が増加するに従い変形抵抗は大きくなっていくが、これは変形による材質の加工硬化と圧縮面積の増大に基因するものである。

各試験片の同一変形量では高さの低いものほど変形抵抗は大きい。これを第7図に示すように同一変形率に換算すれば変形抵抗は各試験片ともに同一となる。

変形率は次の(3)式で求めた。

$$\text{圧縮変形率} = \frac{h_0 - h_1}{h_0} \times 100(\%) \dots\dots\dots (3)$$

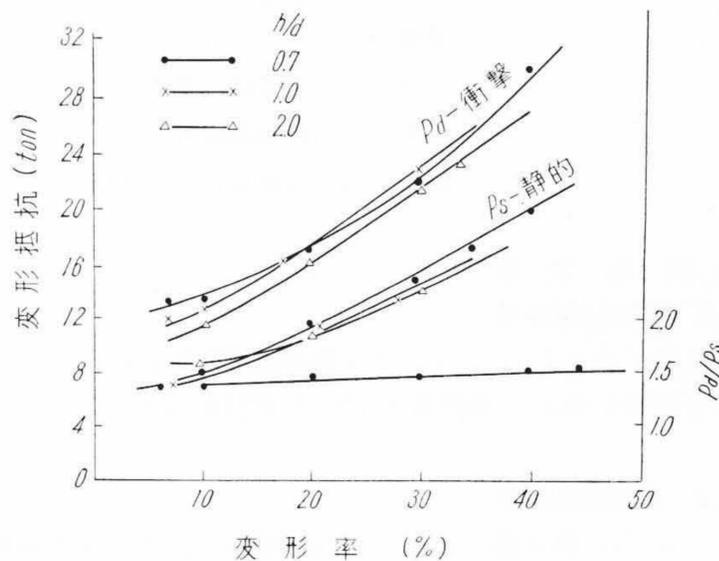
ただし h_0 = 圧縮変形前の高さ (mm)

h_1 = 圧縮変形後の高さ (mm)

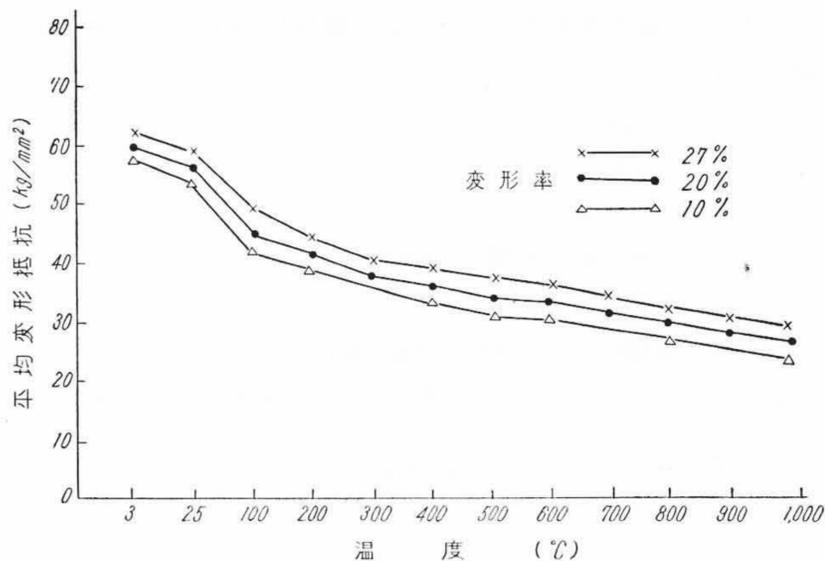
同一変形量でも、衝撃変形抵抗値は静的変形抵抗値に比較し、約1.5倍の抵抗を示している。

2.3.2 各温度における衝撃変形抵抗

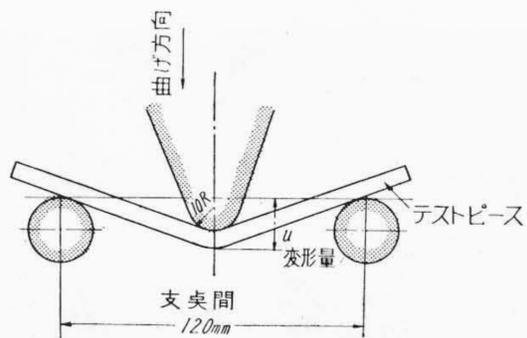
試験片は15φ×15(h/d=1.0)を用いた。高温加熱の場合は加工硬化現象と温度による軟化が同時に起り、その変形過程は複雑となる。第8図によれば変形抵抗は常温より200°C付近まで急激に



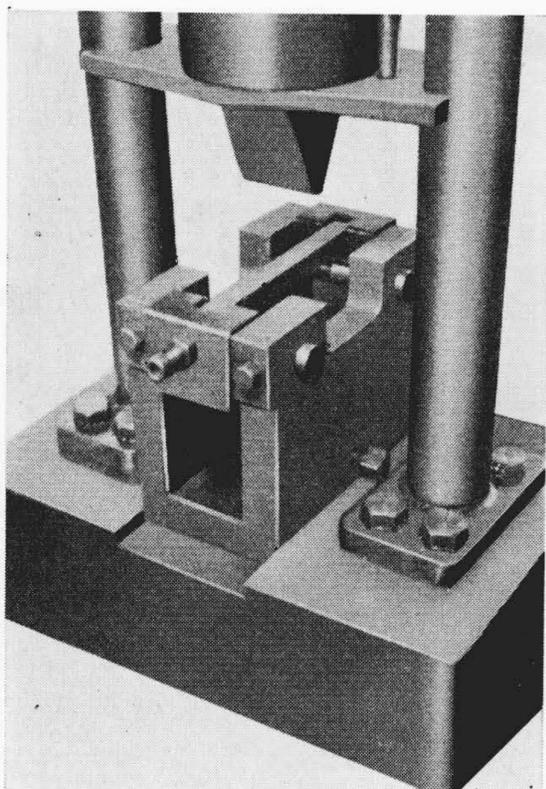
第7図 圧縮変形率—変形抵抗



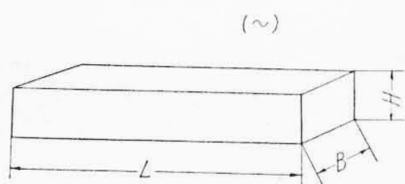
第8図 各温度—平均変形抵抗



第9図 曲げ変形の方法



第10図 衝撃曲げ試験機と曲げ装置



第11図 曲げ試験片の形状

減少しているが、それ以上になれば緩慢に減少している。3°Cに冷却した場合はいくぶん増加している。

3. 曲げ変形について⁽²⁾⁽³⁾

3.1 変形抵抗

自由V曲げの場合の変形抵抗を求めるもので曲げ変形の際の変形抵抗は次の要因に左右される。すなわち(1)変形速度、(2)変形の際の温度、(3)被変形材の形状、(4)曲げ形の形状および曲げ角度などである。

曲げ変形の場合は弾性によるはね返り(Spring back)があるため衝撃変形の場合は衝撃エネルギー(kg-m)、静的変形の場合は静的荷重(kg)を測定した。形状は幅および厚みの異なる板状試験片を用いた。温度は3~800°Cについて実験を行った。変形に用いた曲げ形は自由V曲げ式とした。

3.2 実験方法

3.2.1 静的曲げ変形

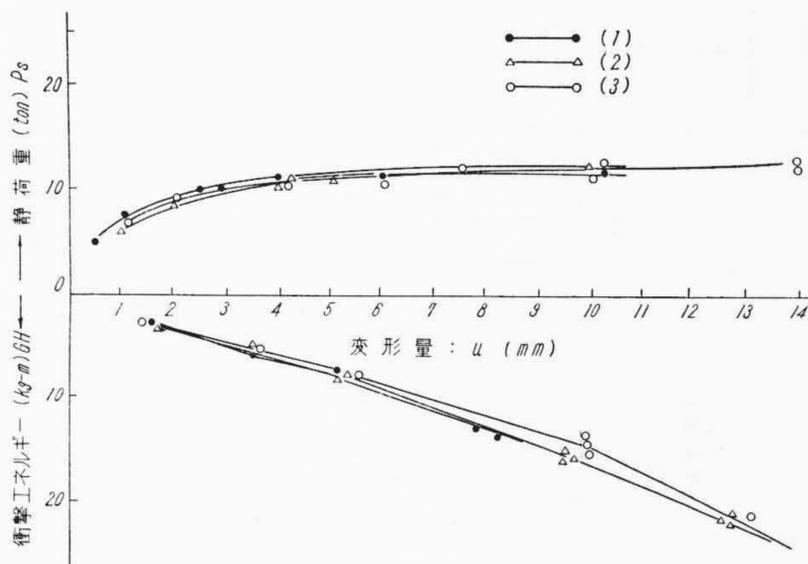
第9~10図に示す曲げ形を用い、アムスラ形万能試験機を使用して実験を行なった。

3.2.2 衝撃曲げ変形

自由落槌式衝撃試験機にて、落槌の落下エネルギー(GH)と変形量(u)の関係を求めた。落槌試験機は圧縮変形に用いたもので

第4表 試験片の寸法

No	H	B	L
1	20.5	8.5	160
2	15.5	15.2	160
3	10.5	35.0	160



第12図 曲げ変形抵抗線図

第10図に示す曲げ装置を使用した。

3.2.3 供試材料

材質はFCMB 32であり、機械的性質は圧縮試験に用いた試料と同様である。

形状は第11図に示す板状であり、断面の形状は各試験片とも同一断面係数になるようにした。

3.2.4 加熱方法

マッフル形電気炉にて所定温度に10分間保持し、すみやかに取り出して変形させた。3°Cの場合は水中に氷塊を入れて3°Cに保ち、その中に浸した。実験を行った際の室温は20~27°Cであった。

3.3 実験結果と検討

3.3.1 常温の場合の変形抵抗

各形状の試料についてGH-uの関係およびPs-uの関係を第12図に示す。変形抵抗は変形量の増加に従って増加するが、変形量が大きくなると、曲げ試験片の外側部に引張応力を生じ、降伏点以上の応力が加わるので、材料の一部が破壊しはじめるため、増加の傾向はゆるやかになり、ついに破断する。各試料とも同一変形量における変形抵抗は同一であり、変形抵抗は断面係数に比例するものと推察される。

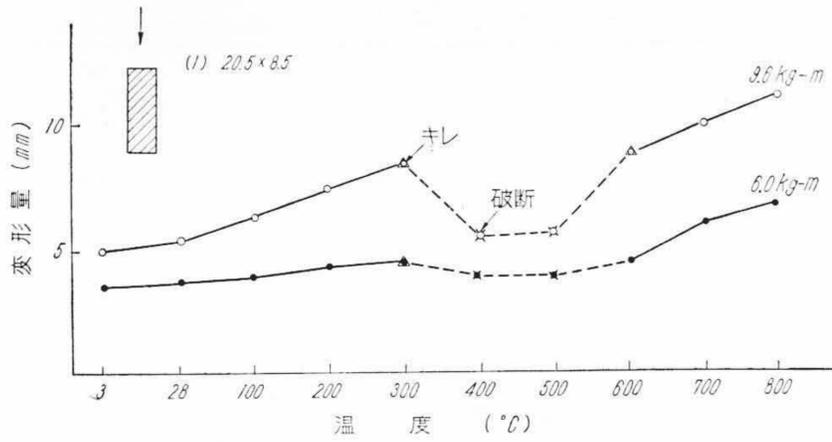
3.3.2 各温度における衝撃変形抵抗

同一変形エネルギーにて変形する変形量(u)の差により、各温度の変形抵抗を比較すると第13~15図のようになる。温度の上昇に伴い、変形量が増加していることは変形抵抗の減少していることを示している。温度が上昇し、300°C付近になると試験片にきれつを発生し、破断を起すようになり、600°Cまでの範囲で非常に脆弱になっているものと考えられる。これはマレブルの脆性を示すものできれつを生じ、破断を起す点は形状および変形量により多少異なっているが、300~600°Cの範囲にて脆性を起しているものと推察される。

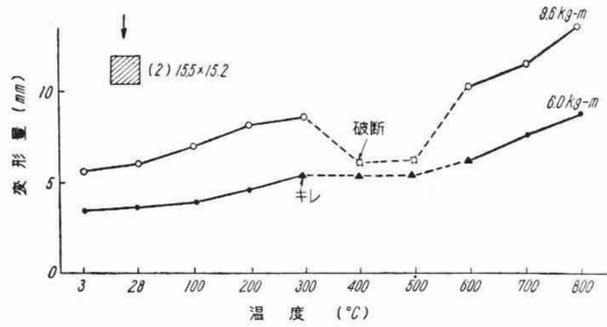
4. 塑性変形による機械的性質の変化⁽⁴⁾

4.1 塑性変形と機械的性質

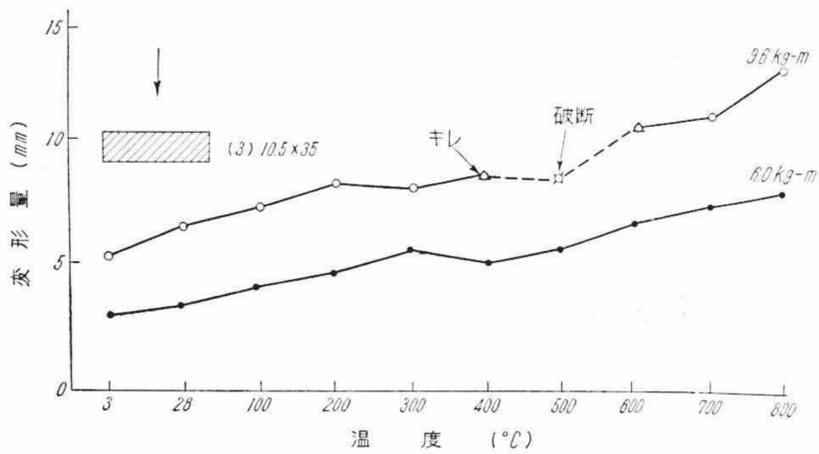
一般金属は塑性加工により、顕微鏡組織が変化し機械的性質が変化することが知られている。マレブルのようにフェライト地に焼鈍炭素が点在する状態では、特に炭素の形状の変化が機械的性質を左



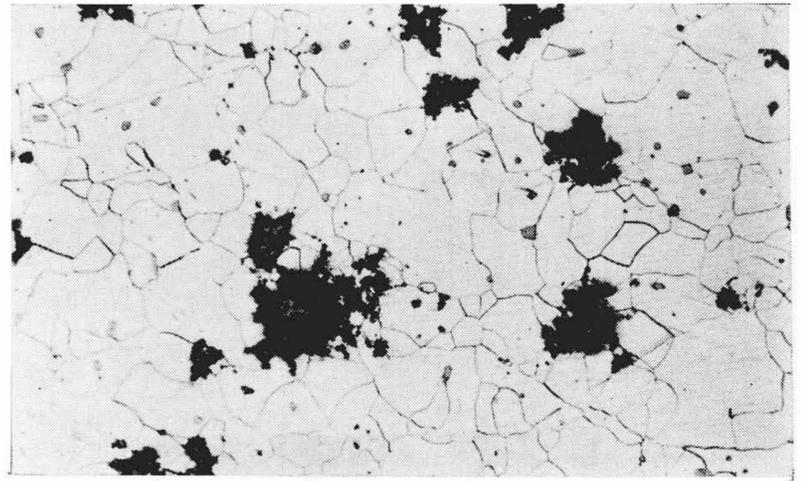
第13図 (1)温度-エネルギー-変形量



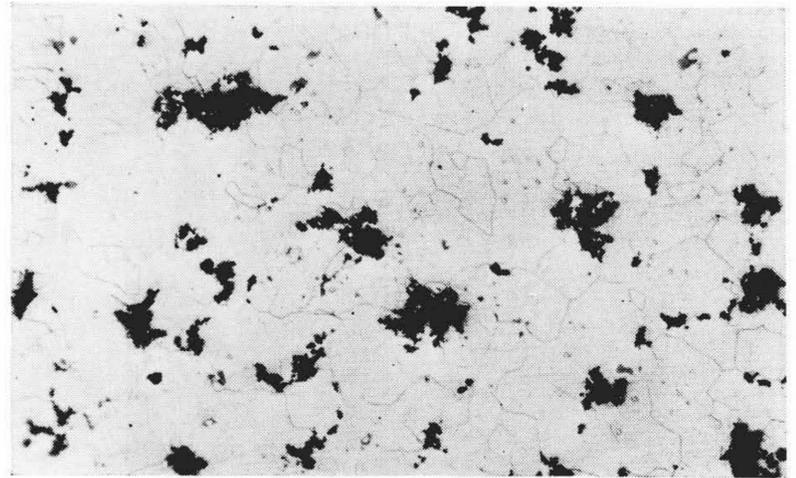
第14図 (2)温度-エネルギー-変形量



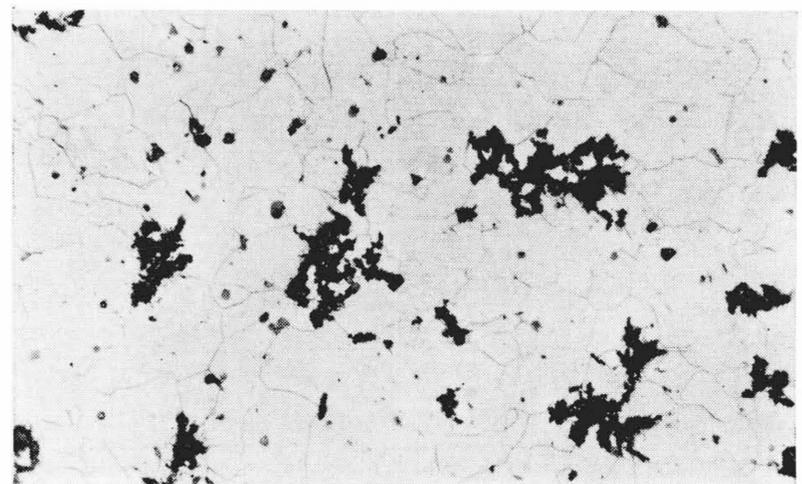
第15図 (3)温度-エネルギー-変形量



第16図 (1) マレブルの組織



第17図 (2) マレブルの組織



第18図 (3) マレブルの組織

右するものとする。本実験では塑性変形により加工硬化した材料を熱処理により軟化させたのちの状態についても調査した。

4.2 供試材料

材質はFCMB32であり、化学成分および熱処理の影響もあると考え日立金属戸畑工場、桑名工場、深川工場（以下(1), (2), (3)と略す）の3工場の試料について調査した。粗材形状は35φ×200および60φ×100の2種であり、その化学成分は第5表に示すとおりである。

各試料の顕微鏡組織を第16, 17, 18図に示す。

4.3 供試試料

粗材より第19図に示すa, b, cの各圧縮試料を削り出し、各試料を軸方向に圧縮し所定の試験片を採取した第6表に試験事項と粗材形状とを示した。

4.3.1 a 抗張力-伸び試料

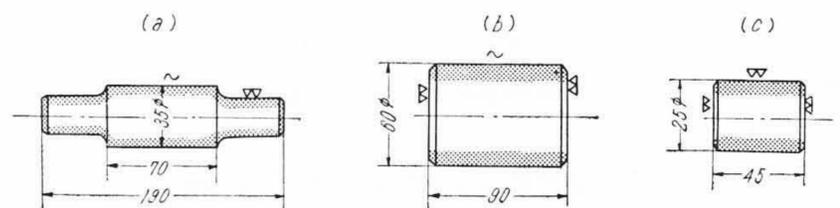
a 抗張力-伸びを測定するa試料は軸方向に圧縮する際に挫屈を生じないように第20図に示す圧縮工具を用い、軸方向に150ton水圧プレスにて静的に圧縮した。

4.3.2 衝撃抗力試料

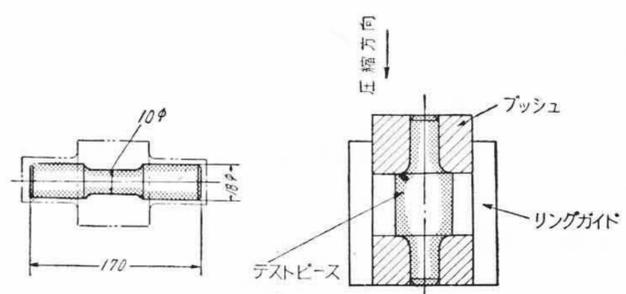
衝撃抗力を測定する(b)試料は軸方向にフリクションプレスにて衝撃的に圧縮を行った。第21図に試験片の採取箇所を示す。

4.3.3 硬度-組織の試料

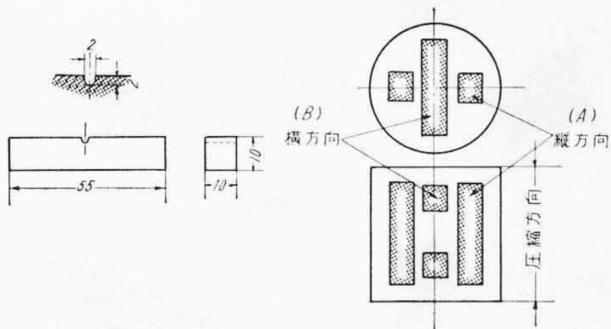
硬度-組織の調査(c)試料はフリクションプレスにて軸方向に衝撃的に圧縮し、第22図に示すように圧縮後に半割して、それぞれの端部および中心部の硬度と組織を調べた。



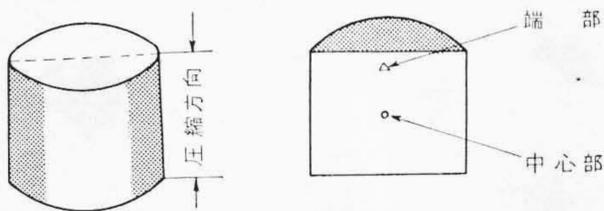
第19図 圧縮試料の形状



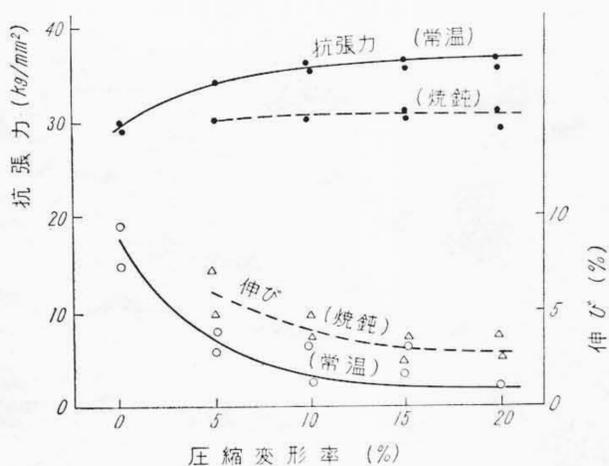
第20図 圧縮工具と引張試験片



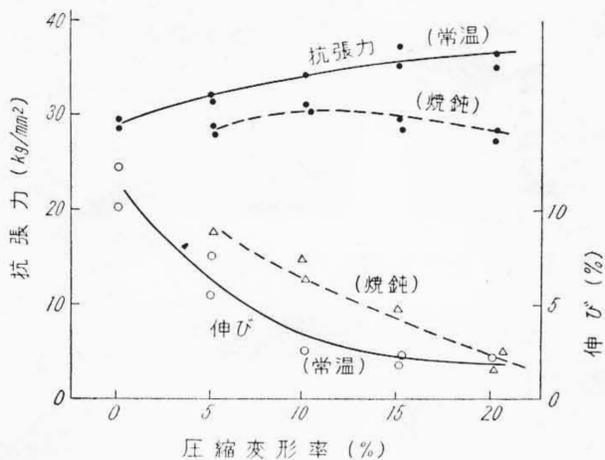
第21図 試験片の採取箇所



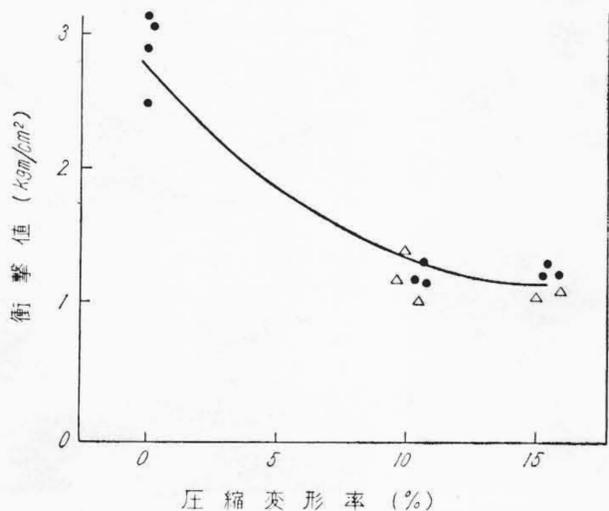
第22図 半割試験片と採取箇所



第23図 ㊸マレブル抗張力—伸びの変化



第24図 ㊹マレブル抗張力—伸びの変化



第25図 ㊸マレブル衝撃抗力の変化

第5表 各工場試験片の化学成分

試料	C	Si	Mn	S	P	Cr
㊸ FCMB	2.69	1.12	0.43	0.11	0.060	
㊹ FCMB	2.47	1.32	0.41	0.113	0.058	0.044
㊺ FCMB	2.57	1.35	0.40	0.118	0.012	0.031

第6表 試験事項と粗材形状

記号	試験事項	粗材形状	試験片
a	抗張力—伸び	35φ×200	10φ引張試験棒
b	衝撃抗力	60φ×100	JIS 3号シャルピ試験片
c	硬度—組織	35φ×200	ブリネル (HB)

第7表 抗張力—伸びの測定値

試料	変形率 (%)	変形後常温のまま		変形後低温焼鈍	
		抗張力(kg/mm ²)	伸び(%)	抗張力(kg/mm ²)	伸び(%)
㊸	0	29.3*	12.5	—	—
		28.8*	10.0	—	—
	5	31.5	5.5	28.0	8.0
		32.0	7.5	28.7	8.0
	10	34.0	2.5	31.2	6.5
		33.6	2.5	30.8	7.5
㊹	15	35	1.8	29.0	3.0
		37.4	2.0	29.3	5.0
	20	36.3	2.0	28.6	2.5
		35.0	1.2	27.4	1.8
㊺	0	30.0*	7.5	—	—
		28.7*	10.0	—	—
	5	30.7	3.8	30.6	5.0
		34.4	2.5	30.6	7.5
	10	35.8	1.2	30.6	5.0
		36.0	3.5	30.6	3.8
15	36.0	3.2	30.8	2.5	
	35.8	1.2	31.0	3.8	
20	36.3	1.2	29.3	2.5	
	35.4	1.2	31.3	3.8	

* 35mmφ丸棒粗材より10mmφの抗張試験片を削出して試験した結果であるから、FCMB 32の規格値より低い値を示している。

熱処理による回復についての検討は(a)粗材を圧縮変形後、A₁変態点以下の温度550°Cにて5時間の低温焼鈍を施して所定の試験片を削り出した。

4.4 実験結果と検討

4.4.1 抗張力—伸び

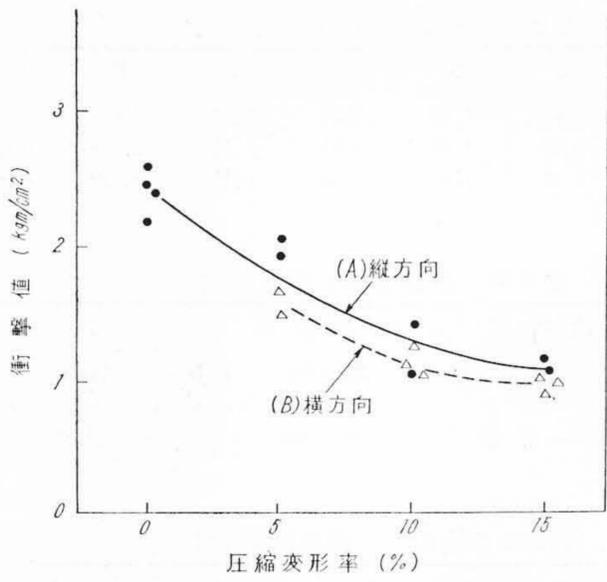
測定結果を第7表および第23, 24図に示す。

抗張力は変形の増加とともに増大している。これは材料の加工硬化現象を示すものである。硬化傾向は圧縮率15%程度まで上昇し約8kg/mm²増加している。また15%以上になるとほとんど増加傾向を示していないことは、これ以上の変形では結晶の一部に破壊現象を起しているものと推察される。このため低温焼鈍により、かたさは軟化するが抗張力は回復していない。

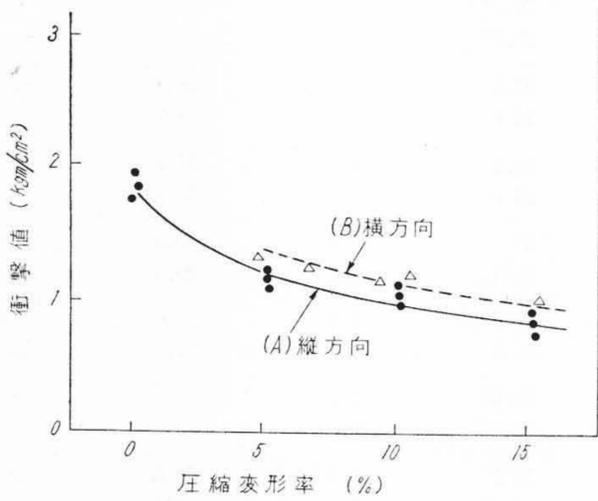
伸びは変形とともに著しく減少する。変形率10%にて伸び2~3%となっている。低温焼鈍によりいくぶん回復しているが、回復は2~3%程度で一度、塑性変形したものは、黒鉛の形状が変化しているため、低温焼鈍を行っても完全に回復することはできない。

4.4.2 衝撃抗力

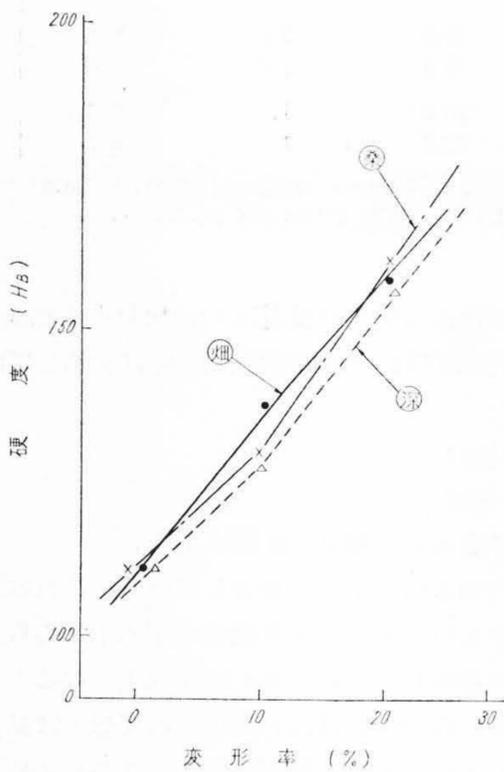
圧縮変形した場合の変化を第25~27図に示す。(A)は縦方向、(B)は横方向の圧縮による加工硬化の方向性を調査したものである。3工場の粗材にて1.0(kgm/cm²)程度の差違があるが、変形率5%以上の場合、各試料ともに1.0(kgm/cm²)程度に減少し非



第26図 ㊟マレブル衝撃抗力の変化



第27図 ㊟マレブル衝撃抗力の変化

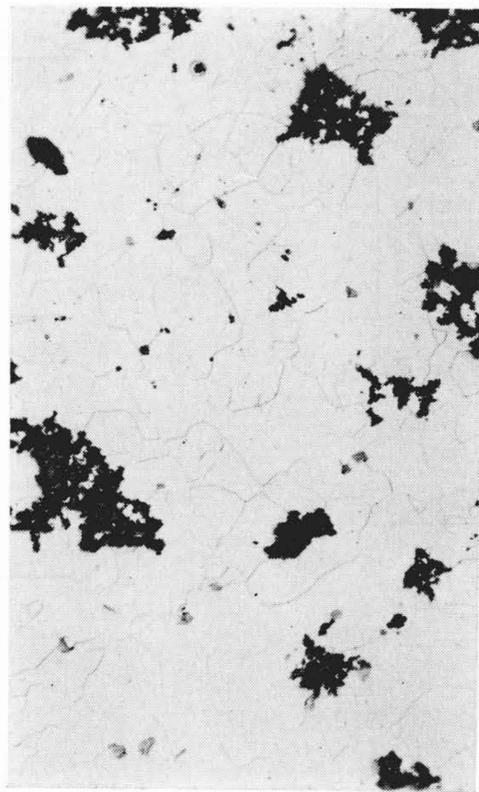


第28図 硬度の変化

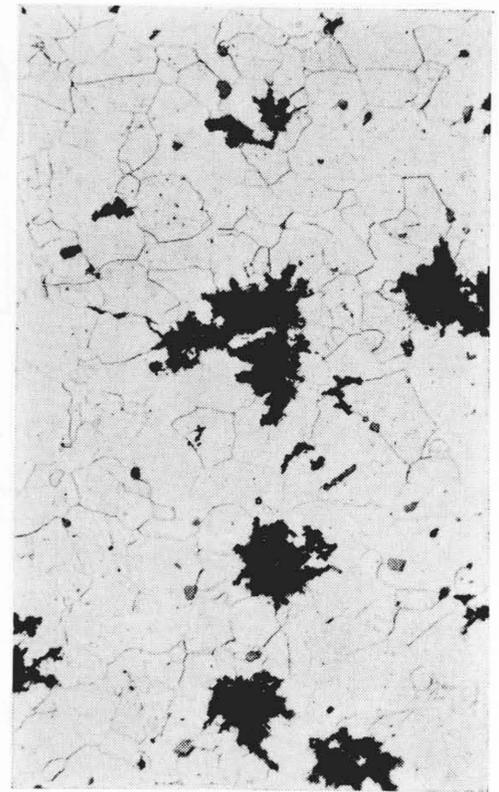
常に脆弱になっている。矯正変形に必要な衝撃値は2~3 (kg-m/cm²) 以上であり、特に衝撃抗力の少ないものおよび変形量の大きいものは加熱して衝撃抗力の大きい範囲で変形を与えなければならない。

4.4.3 硬 度

円柱試験片の最も均一に大きく変形するものと考えられる中心部で硬度を測定した。硬度は変形の増加につれて増加し、各試料とも硬度 110 (H_B) 程度であるが、変形率 10%にて硬度 140(H_B)、30%にて硬度 160

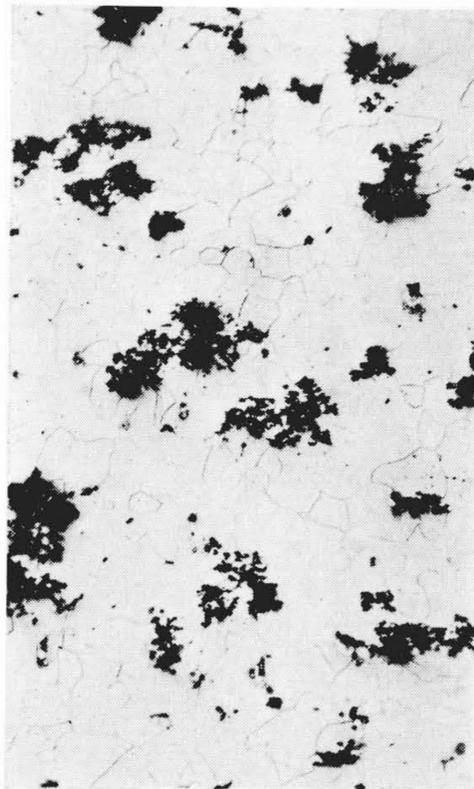


端部 (×100)

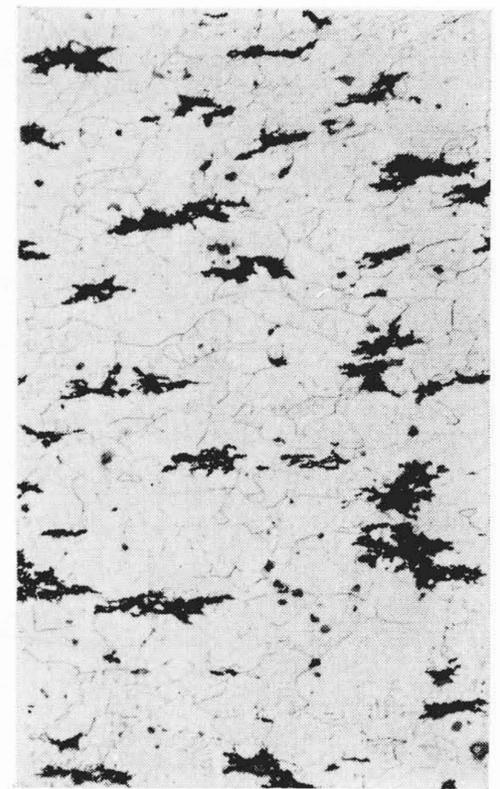


中心部 (×100)

第29図 変形率10%のもの㊟試料

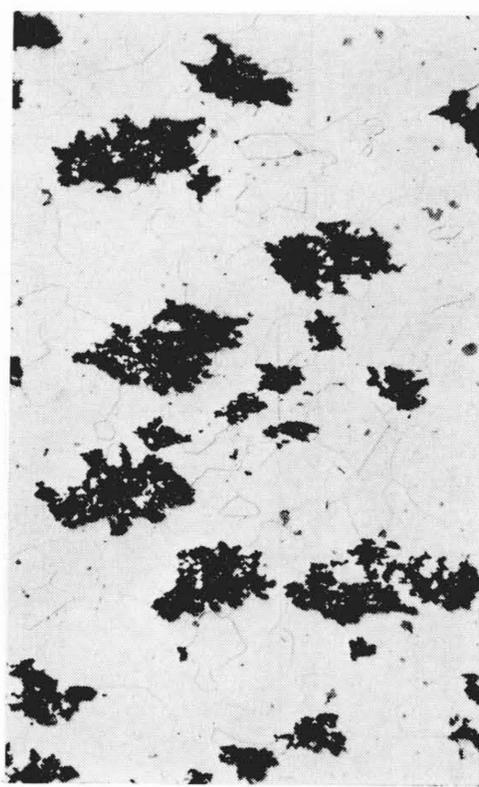


端部 (×100)

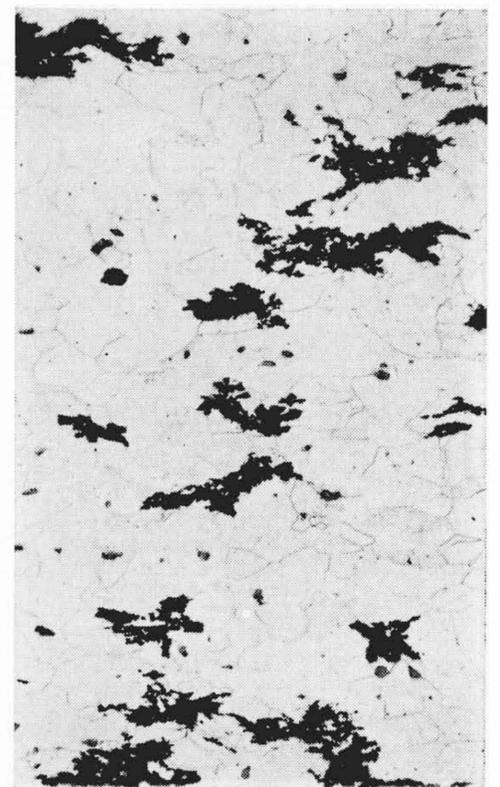


中心部 (100)

第30図 変形率30%のもの㊟試料



端部 (×100)



中心部 (×100)

第32図 変形率30%で低温焼鈍したもの㊟試料

第8表 塑性変形による機械的性質の変化

性 質	変形しないもの	変形率5%	変形率15%
抗張力 kg/mm ²	28~31*	31~34	36~38
伸 び %	8~12	4~8	2~3
衝撃抗力 kg-m/cm ²	1.8~3.0	1.5~2.0	1.0
硬 度 HB	110	115~125	140~150

* 35 mmφ 丸棒粗材より 10 mmφ の抗張試験片を削出して試験した結果であるから、FCMB 32 の規格値より低い値を示している。

(HB)に硬化している。これはあきらかに塑性変形による加工硬化現象を示すものである。

4.4.4 顕微鏡組織

フェライト地に点在する焼鈍炭素の形状の変化を調べるため、試験片を軸方向に圧縮し、中央部の組織を調査した。第29~31図は⑧試料の例を示す。

変形率10%では炭素の形状およびフェライトの結晶の変形はほとんど認められない。変形率30%のものはあきらかに炭素およびフェライトの結晶が圧縮軸に直角の方向に扁平形となっている。このように扁平になった炭素自身は応力に対しきわめて微弱な抗力を有するもので、これがフェライト地に点在する場合無数の切欠部を有することになり、特に外力に対し非常に脆弱になると考える。また、中心部の変形に対し端部はほとんど変形していないことは圧縮変形では端面圧縮面の摩擦により中心部に大きな変形が起きることを示すものである。変形率30%のものを低温焼鈍しても扁平になった炭素の形状は回復していない。これは低温焼鈍を行っても機械的性質は完全に回復しないことを示すものである。

5. 結 言

以上実験により判明したことを要約すれば

- (1) 圧縮変形抵抗は衝撃的に変形を与える場合、静的変形に比較し大きな抵抗を示す。
- (2) 変形抵抗は加熱により減少するが、300~600°Cの範囲にて脆性を生ずる。ゆえにひずみ取りの温度は常温でもよいか、衝撃値の大きい 100~200°Cが最適温度である。
- (3) 塑性変形が大きくなると機械的性質は著しく変化する。変形の増加にともない

- (a) 抗張力および硬度は増大する。
- (b) 伸びおよび衝撃抗力は減少する。

上記のように機械的性質は変化するが、実際製品の矯正作業の場合の変形率は5%以下であり、現在ひずみ取り作業を実施している一般自動車部品および継手などについては第8表に示すように問題にならない。鋳物の形状により焼鈍後の変形が特に大きいものは矯正変形後に熱処理を施し、加工硬化の影響を除くことが望ましい。

参 考 文 献

- (1) 山内： 塑性変形と加工 148 (昭 26-8 日刊工業新聞社)
- (2) 益田： 薄板の曲げ加工 136 (昭 33-7 誠文堂新光社)
- (3) 菊田： 鋳物本質論 300 (昭 14-5 工業図書)
- (4) 飯高： 球状黒鉛鋳鉄の研究 第2集 313 (昭 29-1 日刊工業新聞社)
- (5) 松浦： 日本機械学会誌 62, 489 1387 (昭 34)
- (6) 松浦： 機械の研究 10 No.1 19 (昭 33)
- (7) 橋爪： 機械の研究 10 No.1 31 (昭 33)
- (8) 金属学会： 金属便覧 4.2 加工 301 (昭 32-2)



特 許 と 新 案

最近登録された日立製作所の実用新案

実用新案	名 称	氏 名	登録年月日	実用新案	名 称	氏 名	登録年月日
518000	振動形交直変換装置の蓄電器振動装置	齋藤致種	35. 8. 19	518052	分配器用配電子	市毛清進	35. 8. 19
518002	スリット調整装置	野田保武	"	518053	分配器用配電子	市毛清進	"
518004	計測電極に対する温度補償用感温素子	小二久夫	"	517988	ガンマ線照射装置	市毛清進	"
518009	バルブ	田沢卓	"	518012	照光表示装置	市毛清進	"
518013	回転形真空ポンプ用油槽	古館清次	"	518014	ハンドル装置	市毛清進	"
518016	複動弁式気化器	鈴木正一	"	518029	変圧器とキュービクル間の接続装置	市毛清進	"
518020	洗濯機	田沢卓	"	517985	冷媒制御装置	市毛清進	"
518024	洗濯機	佐藤清裕	"	518003	テレビジョンアンテナ	市毛清進	"
518026	開閉器接点	広島	"	517992	エレクトロルミネセンスによる模様発光板	市毛清進	"
518030	気化器	森通次	"	518034	半導体整流器素体	市毛清進	"
518042	複動弁式気化器	桜井正一郎	"	518006	蛍光灯器具	市毛清進	"
518047	気化器	森通次	"	518037	透光板枠取付装置	市毛清進	"
518048	直流高圧発生装置	池上和一	"	518038	透光板枠取付装置	市毛清進	"
518049	点火用分配器	市毛清進	"	518039	金属化紙大容量蓄電器	市毛清進	"
518050	分配器配電子	市毛清進	"				
518051	分配器用配電子	市毛清進	"				