

鋼の靱性に及ぼす球状セメンタイト粒度の影響

The Effect of Spheroidal Cementite Size on Toughness of Steel

菊田 光 男* 守 谷 光 正*
Mitsuo Kikuta Mitsumasa Moriya

内 容 梗 概

靱性におよぼす球状セメンタイト粒度の影響について調べた結果、砂鉄系刃物鋼はくず鉄系高炭素鋼に比べ全般に格段に高い靱性を有するが、セメンタイト粒の変化に対する影響は大きく1~2μが良好である。これに対しくず鉄系試料は粒度の影響があまり認められないが過大粒が存在する場合やや靱性を低下する傾向が認められる。

1. 緒 言

刃物鋼に限らず通常高硬度における切味と靱性を要求される工具鋼は、焼入前の炭化物の球状化が重要であることはすでに十分認識されているところである。筆者らはさきに刃物鋼の靱性に及ぼす原料鉄の影響⁽¹⁾ならびに熱処理の影響⁽²⁾について報告した。そのさい靱性と焼入前の焼鈍法の関係について述べ、一部セメンタイトの球状化との関係についても言及したが、主として焼鈍温度を変化した場合、球状化の良好な低温焼鈍の場合が靱性を向上させるという傾向をあきらかにしたものである。本報はこの点をさらに詳細に追求するため、セメンタイトの球状化の程度と靱性との関係について検討したものである。

2. 試料および実験方法

2.1 試 料

試料を選定するにあたって、セメンタイトの球状化性のある程度支配すると考えられる原料鉄の影響をも考慮し、砂鉄系原料鉄100%の高級刃物鋼(白紙2号)と全くくず鉄製の高炭素鋼(SK-2)の2種を選んだ。第1表および第2表はそれぞれ各試料の化学成分とガス分析値を示す。これより砂鉄系試料(白2)はC以外の成分元素および不純元素がくず鉄系SK-2に比べはるかに少なく、低温抽出した場合の酸素と窒素も明らかに低いことが認められる。これらのガスを含む不純元素の多少による差異のみによっても当然セメンタイトの球状化性ないしは靱性に影響することが推定される。

2.2 実 験 方 法

本研究の主要目的はセメンタイトの粒度のみが変った場合、靱性にいかなる影響を及ぼすかを明らかにするにある。したがってセメンタイト粒度の変化以外はなるべくほかの因子が入らないようにしたかったが、実際問題として種々の球状化組織を得るためにはやはり熱処理その他を変化せざるを得なかった。

初めに予備実験として引抜素材(10φ圧延材→8.5φ引抜→7.6φ引抜後700℃×1時間焼鈍→6.5φ引抜→5.5φ引抜後700℃×1時間焼鈍→5φセメンターレス仕上)を用い焼準その他9種の球状化処理を行ない、球状化の程度および粒度を検鏡し6種の球状化処理を決定した。これを第3表に示す。上記予備実験中で冷間加工との関係⁽³⁾も調べたが一部に黒鉛を生じたため採用しなかった。表中、試料No.①~⑥は砂鉄系の白紙2号、No.⑦~⑫はくず鉄系SK-2で、数字の多いほど顕微鏡組織からみて粒度の大なるものが存在することを示す。また上述のように熱処理温度の差異による影響をなるべく避けたかったが、No.⑥と⑫は低温焼鈍でセメンタイトを粗大化できなかったため、やむなく採用したものである。上記球状化処理はいずれも5φ×70l試験片に成形後、酸化脱炭のほとんど

* 日立金属工業株式会社安来工場

第1表 試料の化学成分

溶番	鋼種	試料	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Sn	Cu	As
61090	白2	A	1.15	0.14	0.30	0.016	0.003	0.01	0.03	0.002	0.02	Tr
52559	SK-2	E	1.18	0.25	0.43	0.025	0.007	0.08	0.07	0.031	0.16	0.03

第2表 試料のガス分析値(真空溶融法)

分析温度 ガス の種類 試料	1200℃ 抽出ガス				1600℃ 抽出ガス			
	全ガス (cc/ 100 g)	[H] (%)	[O] (%)	[N] (%)	全ガス (cc/ 100 g)	[H] (%)	[O] (%)	[N] (%)
A	4.21	0.00009	0.0003	0.0035	6.95	0.00009	0.0019	0.0043
E	4.85	0.00007	0.0006	0.0041	8.99	0.00007	0.0021	0.0066

第3表 各試料のセメンタイト球状化処理法

試料 (No.)	球状化処理の方法
① ⑦	鍛伸灰冷後750℃×2時間焼鈍
② ⑧	引抜素材のまま、(中間焼鈍3回)
③ ⑨	引抜加工後700℃×4時間焼鈍
④ ⑩	引抜加工後750℃×1時間焼鈍
⑤ ⑪	引抜加工後750℃×3時間焼鈍
⑥ ⑫	引抜加工後800℃×1時間焼鈍

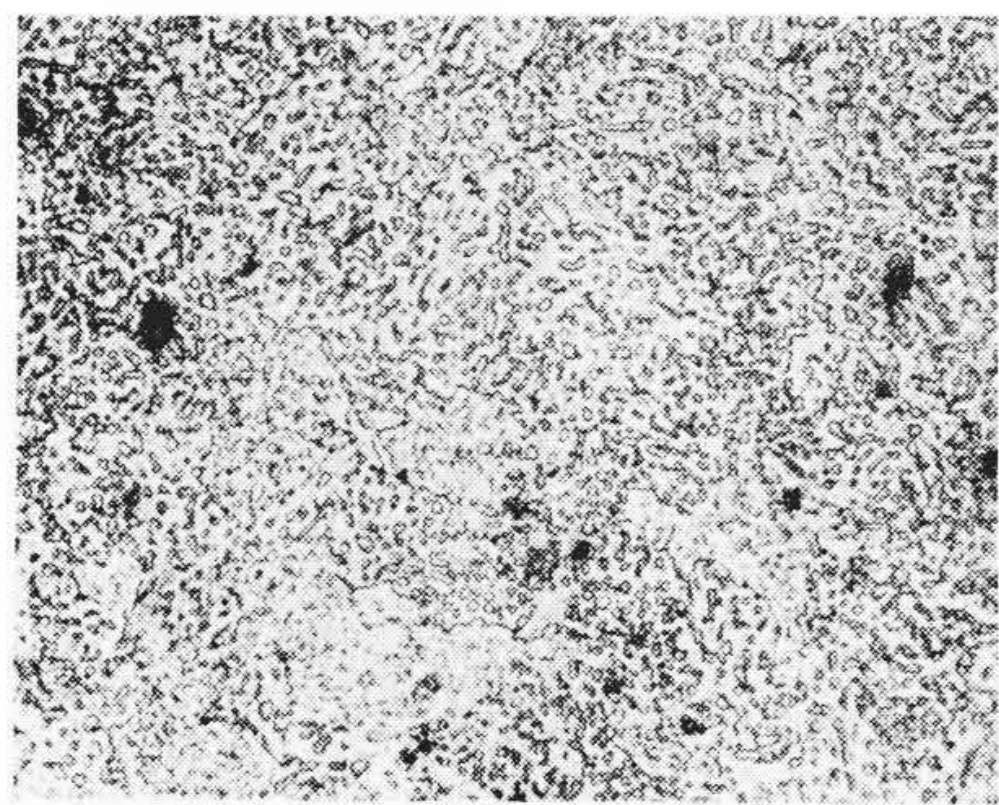
ないようドライ粉を充てんした焼鈍ケース中で行なった。そのほかの試験法については前報⁽¹⁾と同様であるから省略する。

3. 実 験 結 果

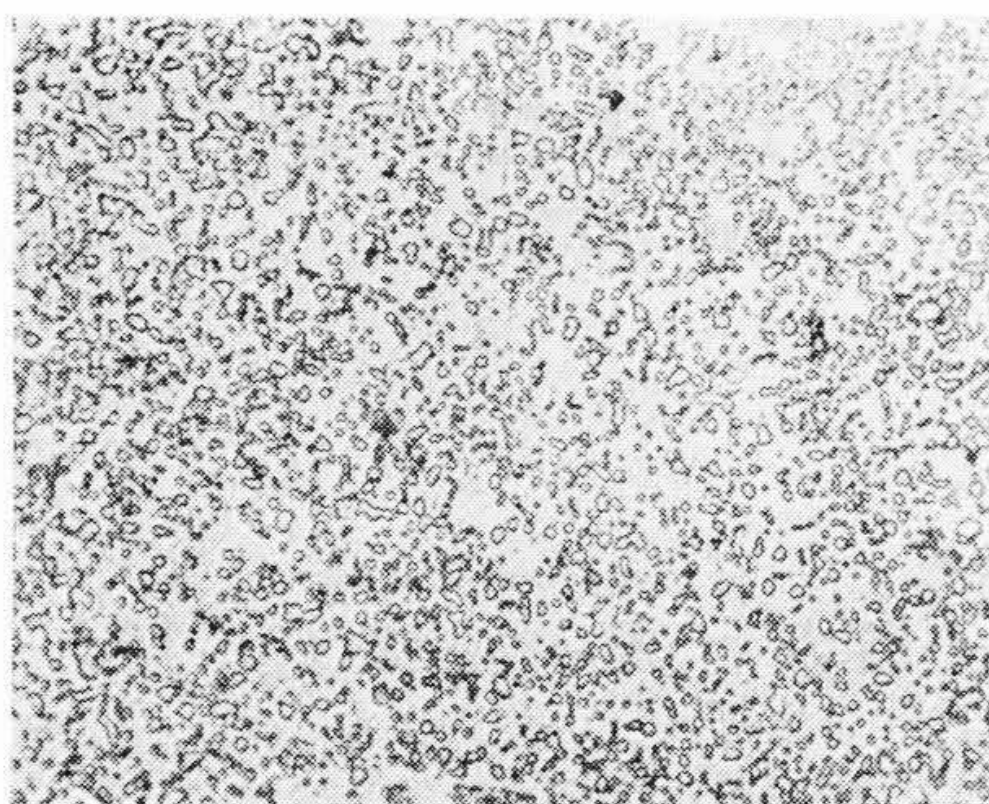
3.1 セメンタイト粒度分布

第1~6図は砂鉄系試料の顕微鏡組織を、同じく第7~12図はくず鉄系試料の場合を示す。これらを綿密に観察すると、粒状パーライト組織と一口にいっても果して何μのセメンタイトがどのように分布しているかは簡単に決定できない。第13~16図は各試料中から代表的なものを電子顕微鏡で撮影したものでこの間の状況がよくわかる。たとえば第13図は光学顕微鏡組織の第3図と同じものであるが、比較的粒度のそろったとみられるこの場合でも粒度にはかなり変化のあることが知られる。また第9図では一見良好な粒状パーライト組織とみられるくず鉄系のNo.⑨も電子顕微鏡組織では第14図に示すとおり完全な球状セメンタイトが少ない場合もある。セメンタイトの球状化の程度を判定する方法として焼鈍硬度を測定する場合があるが、炭素鋼においては球状化が進行し、初析セメンタイトがある程度粗大化した場合に最低硬度を示すことが多い。

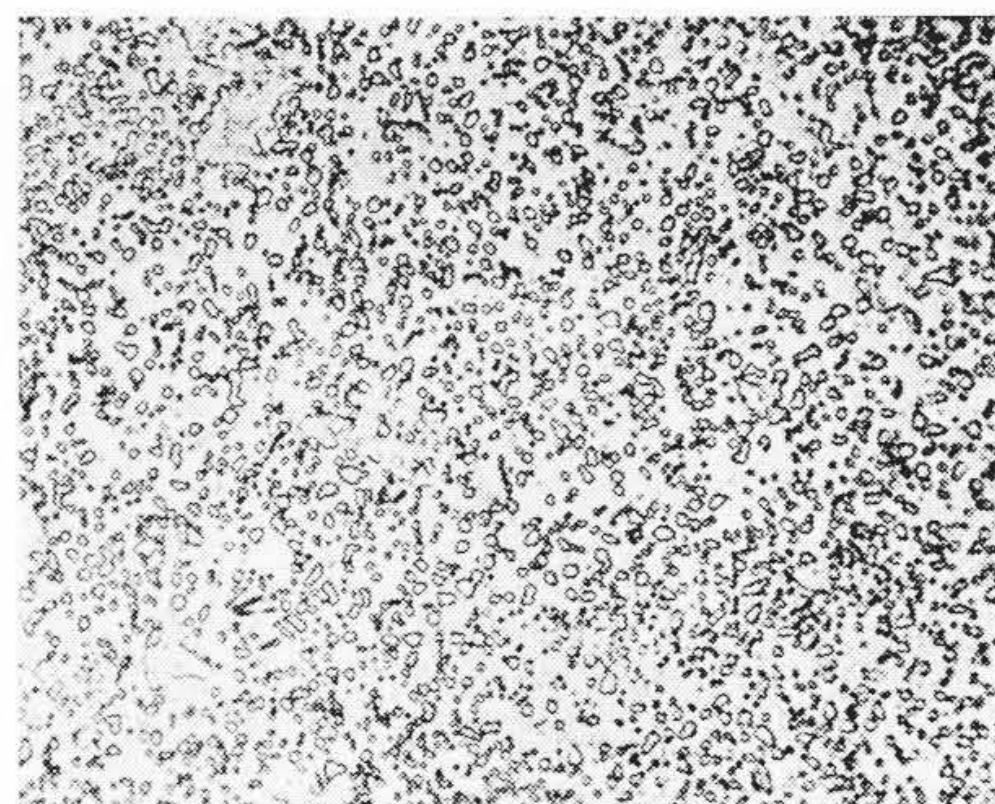
したがってこの場合の顕微鏡組織は混粒の傾向が強く焼鈍温度としても比較的に高温(780~800℃)であり靱性をやや低下する熱処理といえる⁽¹⁾。いま球状セメンタイトの粒度ならびに分布をもっとも確実に調べるには電子顕微鏡組織が有効であることは上述のとおりであるが、なにぶん電子顕微鏡組織は視野が非常に狭く、全部の試料について平均粒度分布を調べるのは容易でない。粒状パーライ



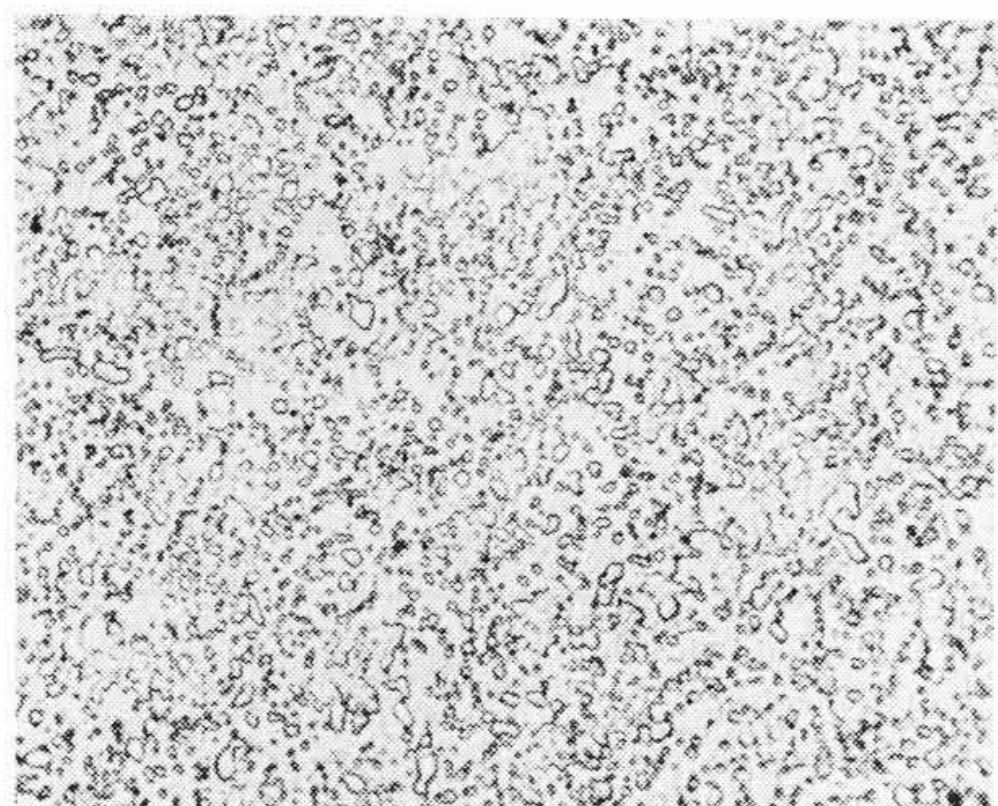
第 1 図 試料 No. ① (白 2) ×400



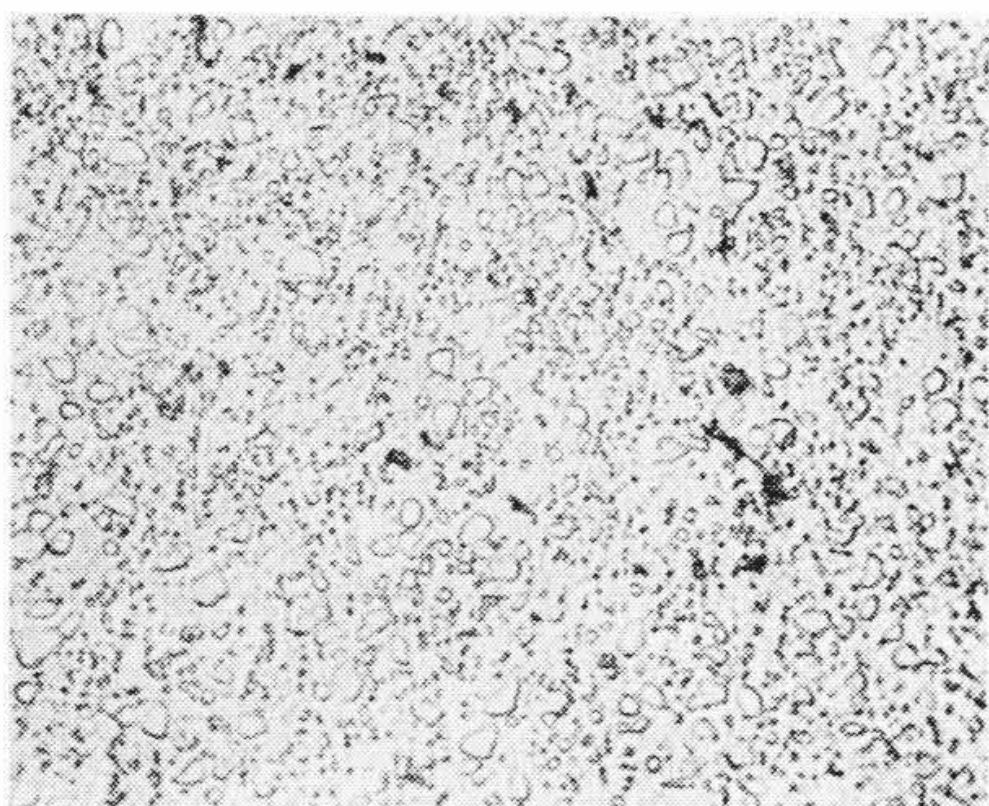
第 2 図 試料 No. ② (白 2) ×400



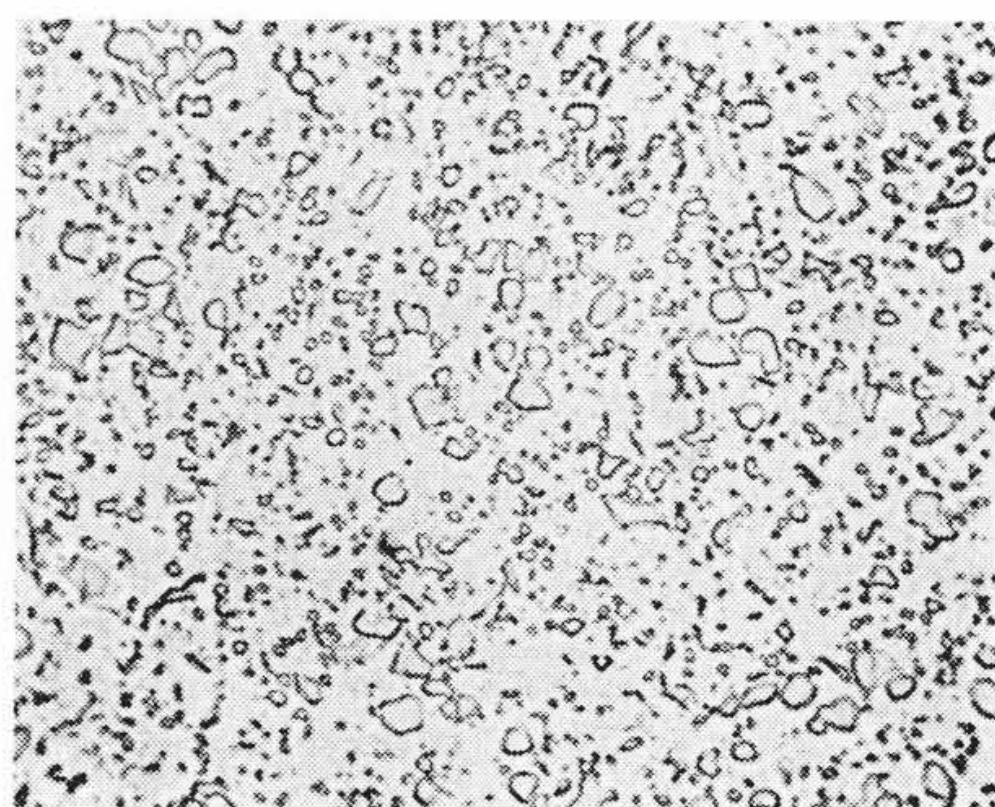
第 3 図 試料 No. ③ (白 2) ×400



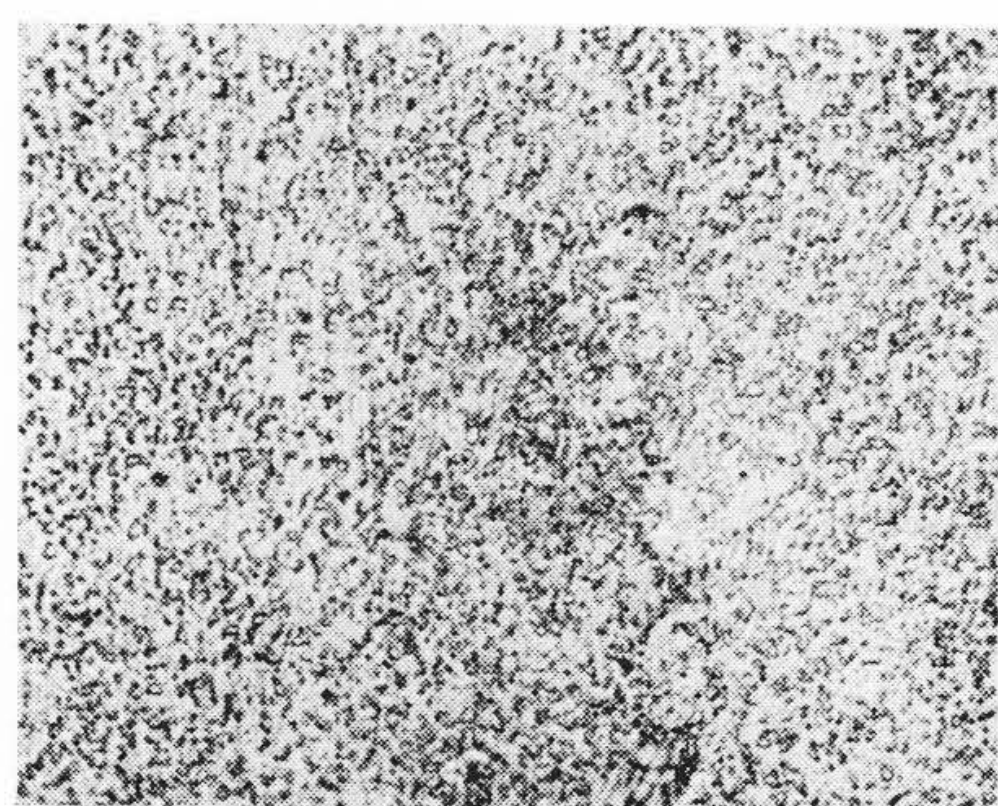
第 4 図 試料 No. ④ (白 2) ×400



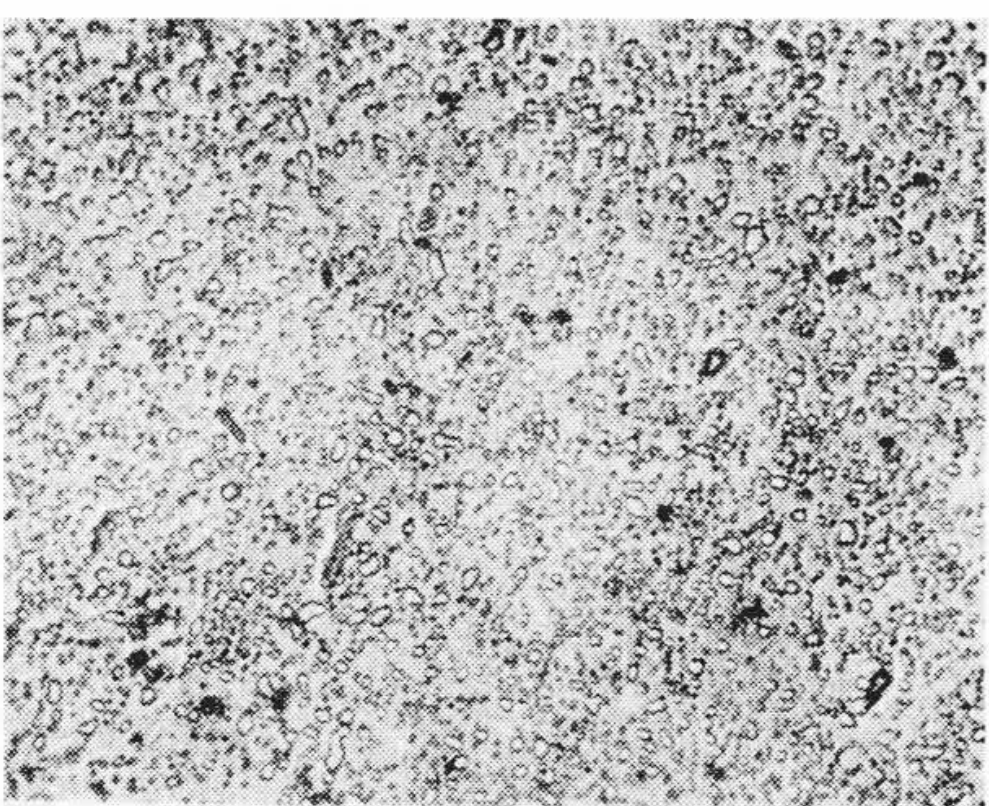
第 5 図 試料 No. ⑤ (白 2) ×400



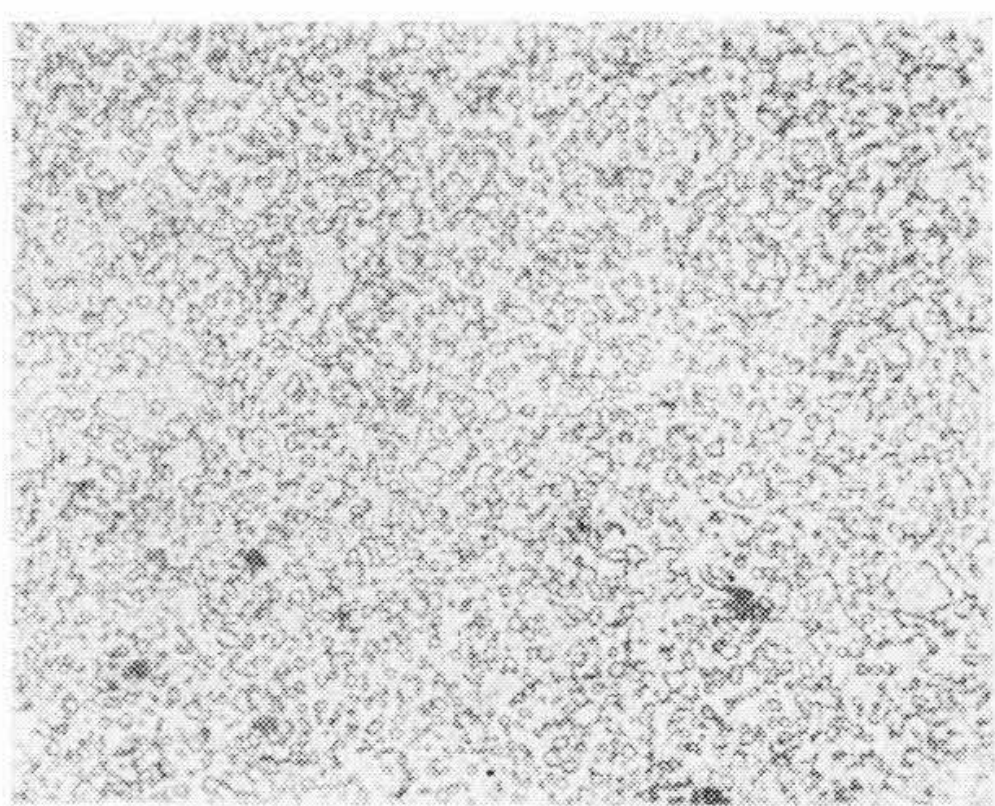
第 6 図 試料 No. ⑥ (白 2) ×400



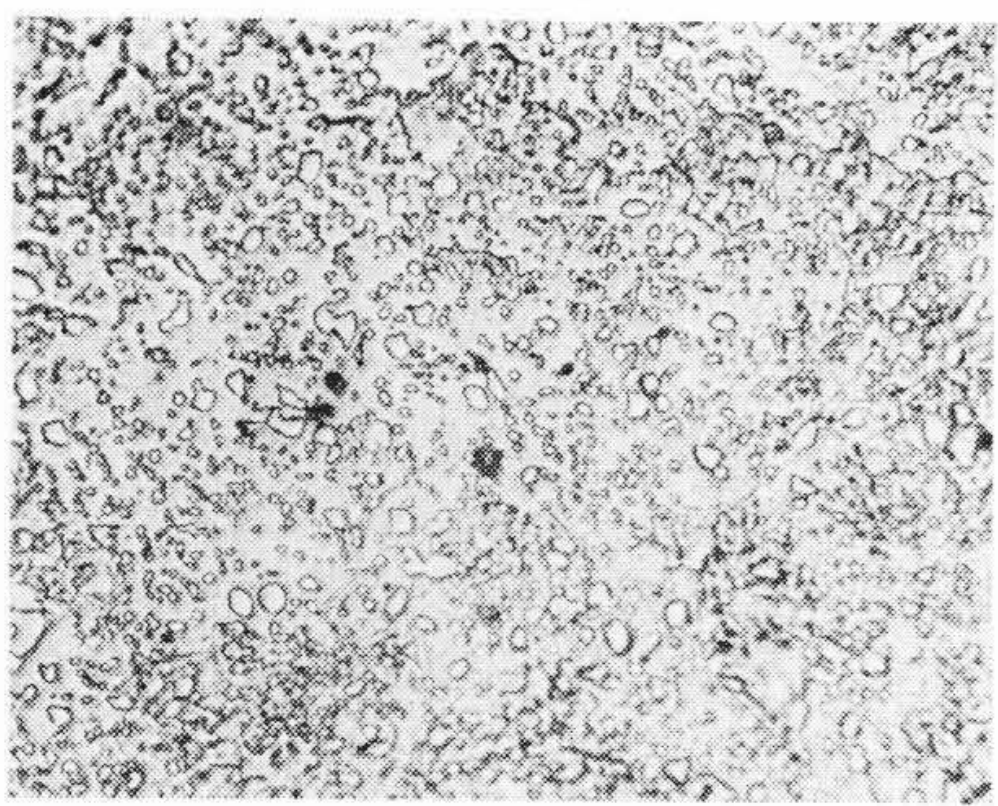
第 7 図 試料 No. ⑦ (SK-2) ×400



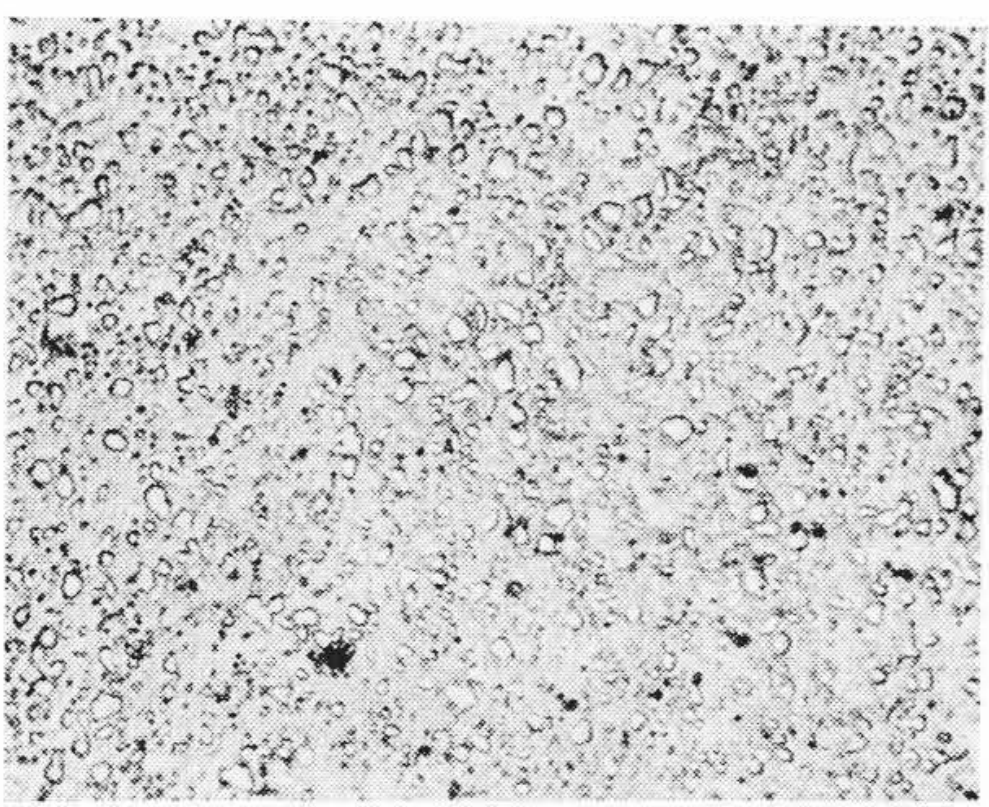
第 8 図 試料 No. ⑧ (SK-2) ×400



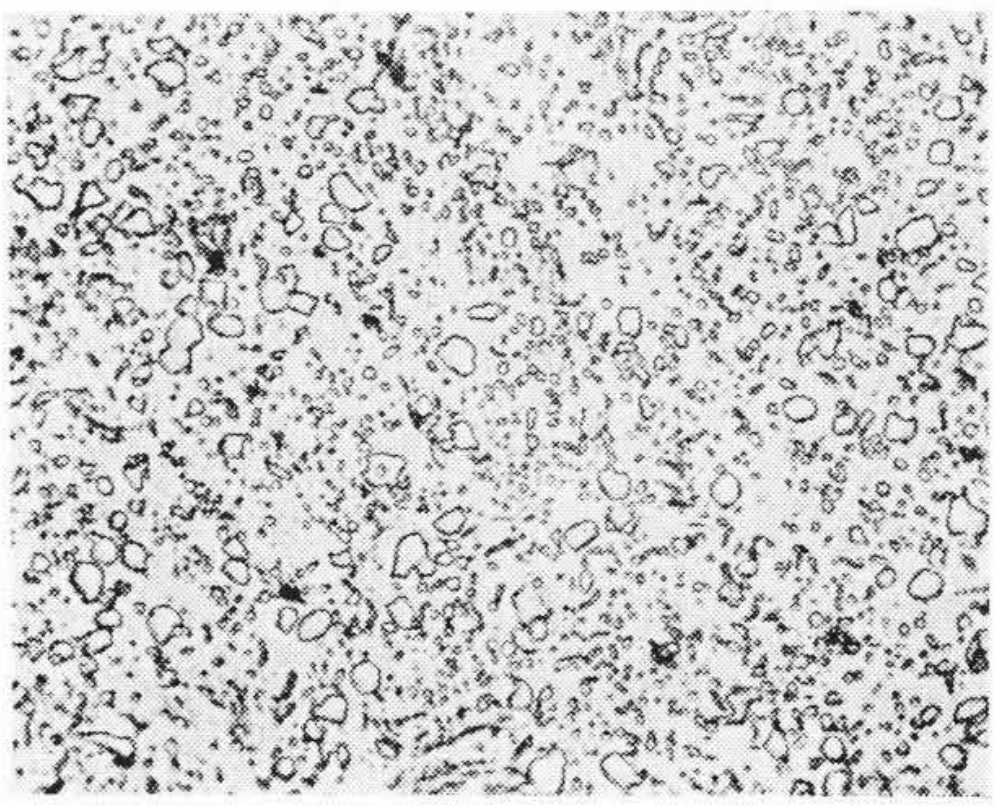
第 9 図 試料 No. ⑨ (SK-2) ×400



第 10 図 試料 No. ⑩ (SK-2) ×400



第 11 図 試料 No. ⑪ (SK-2) ×400



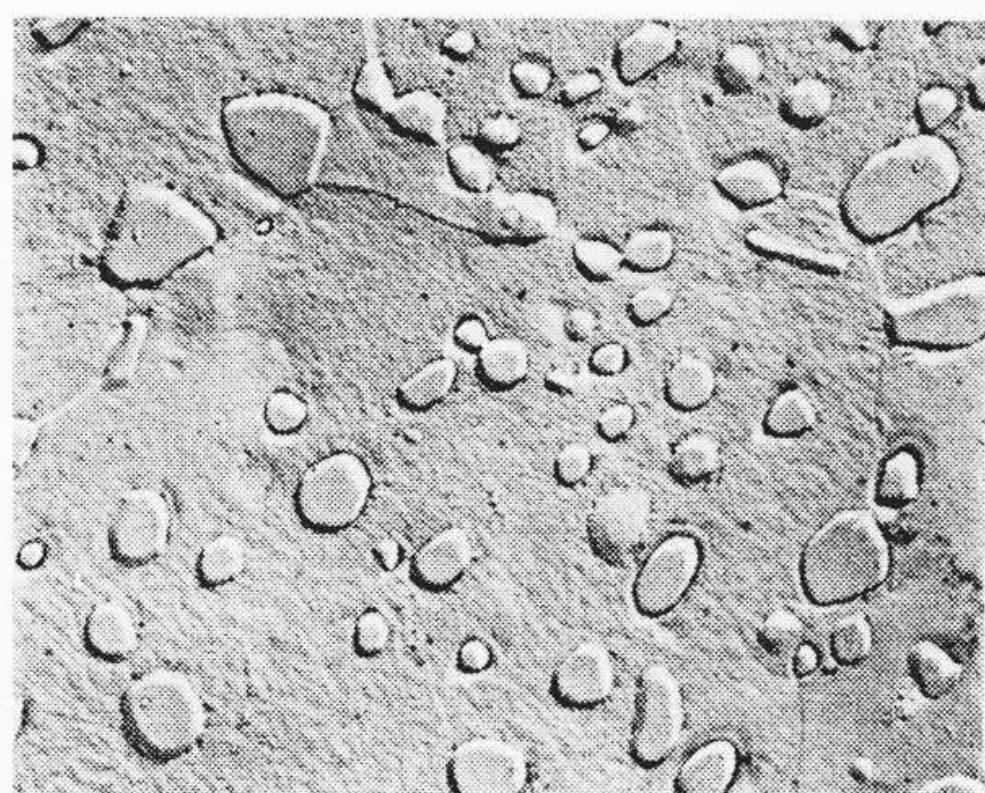
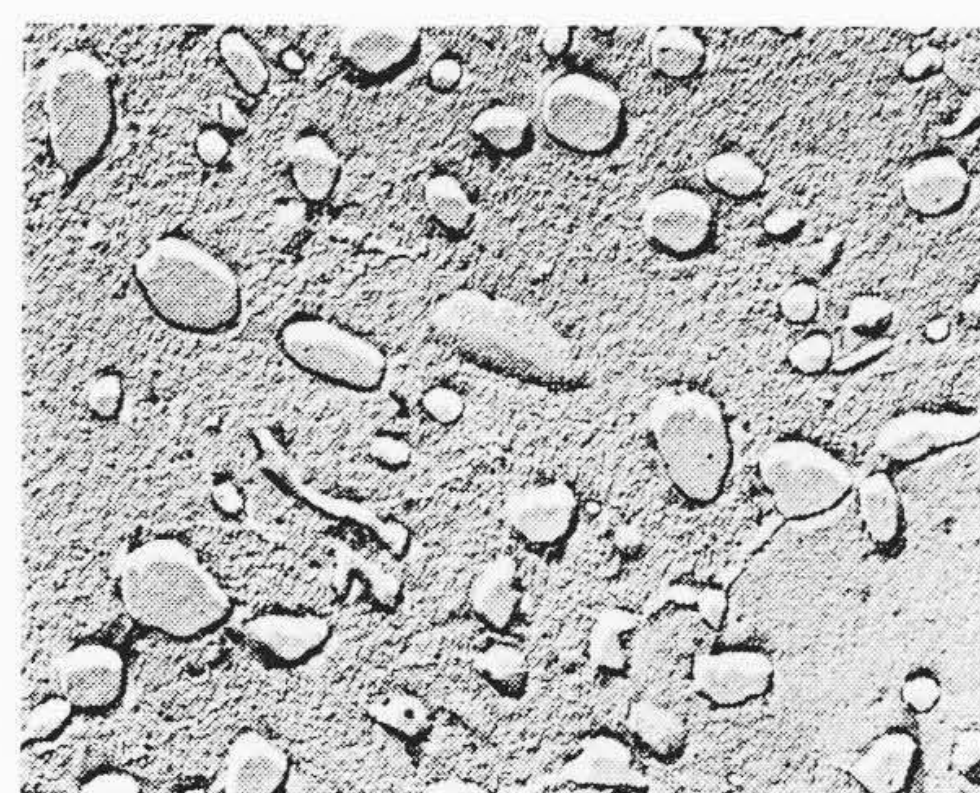
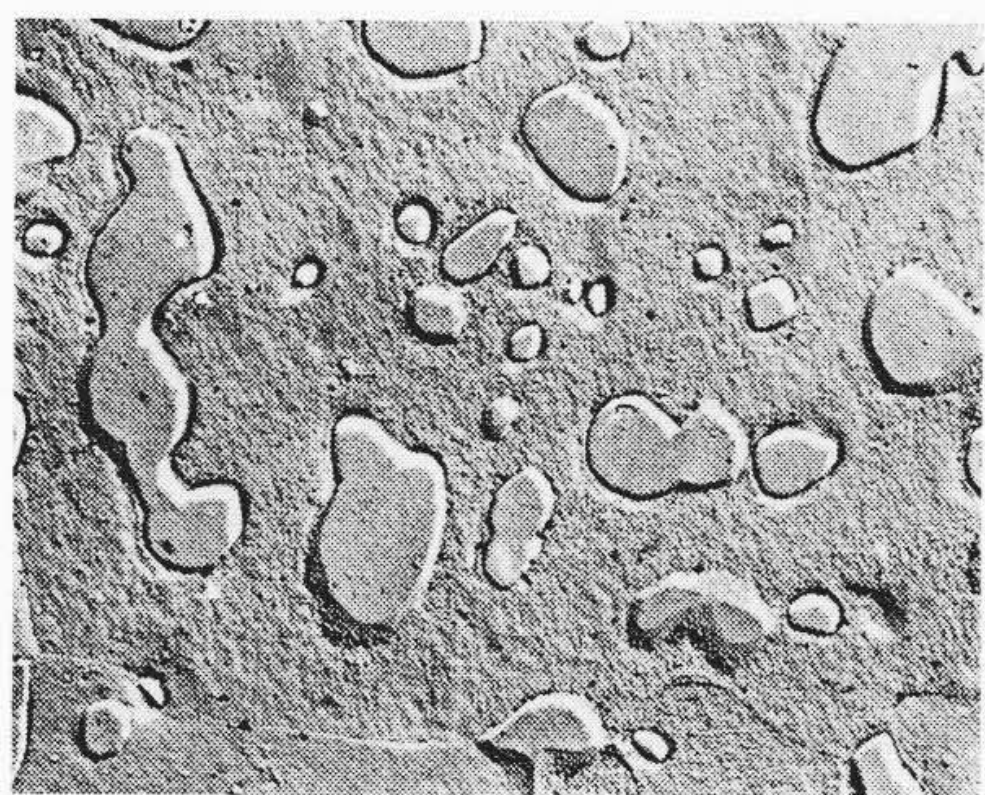
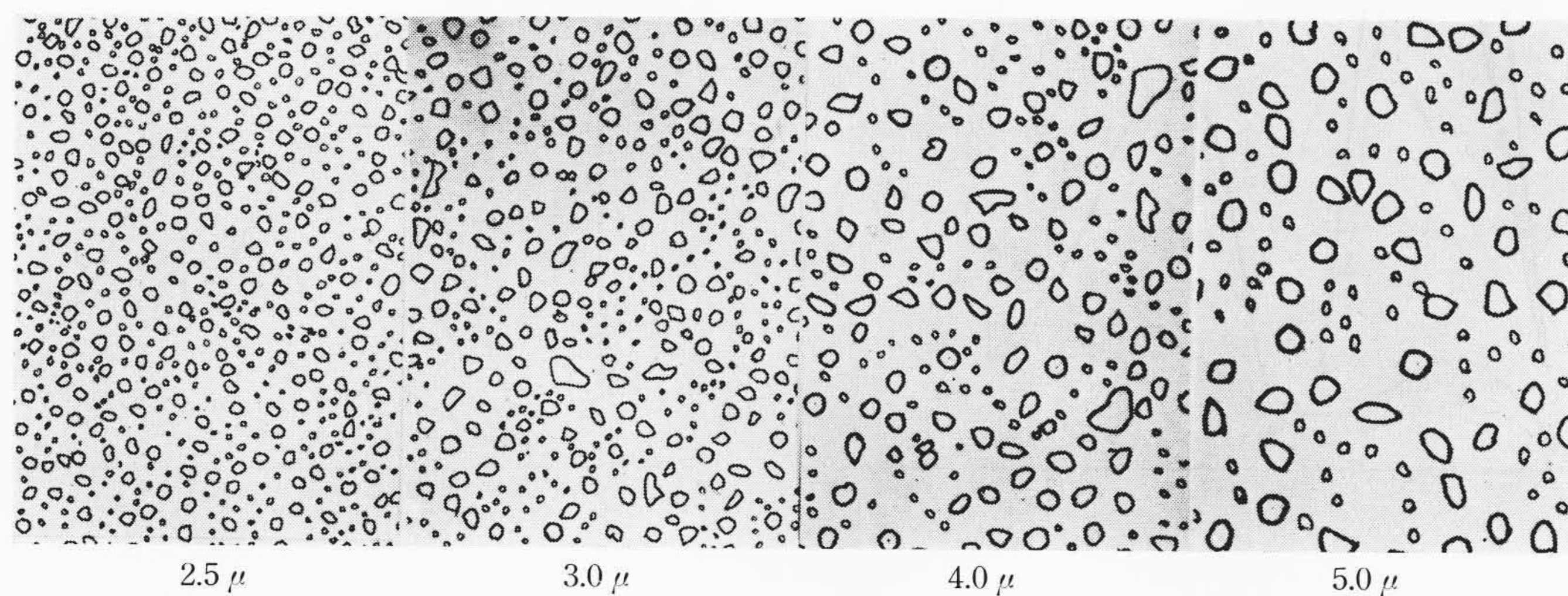
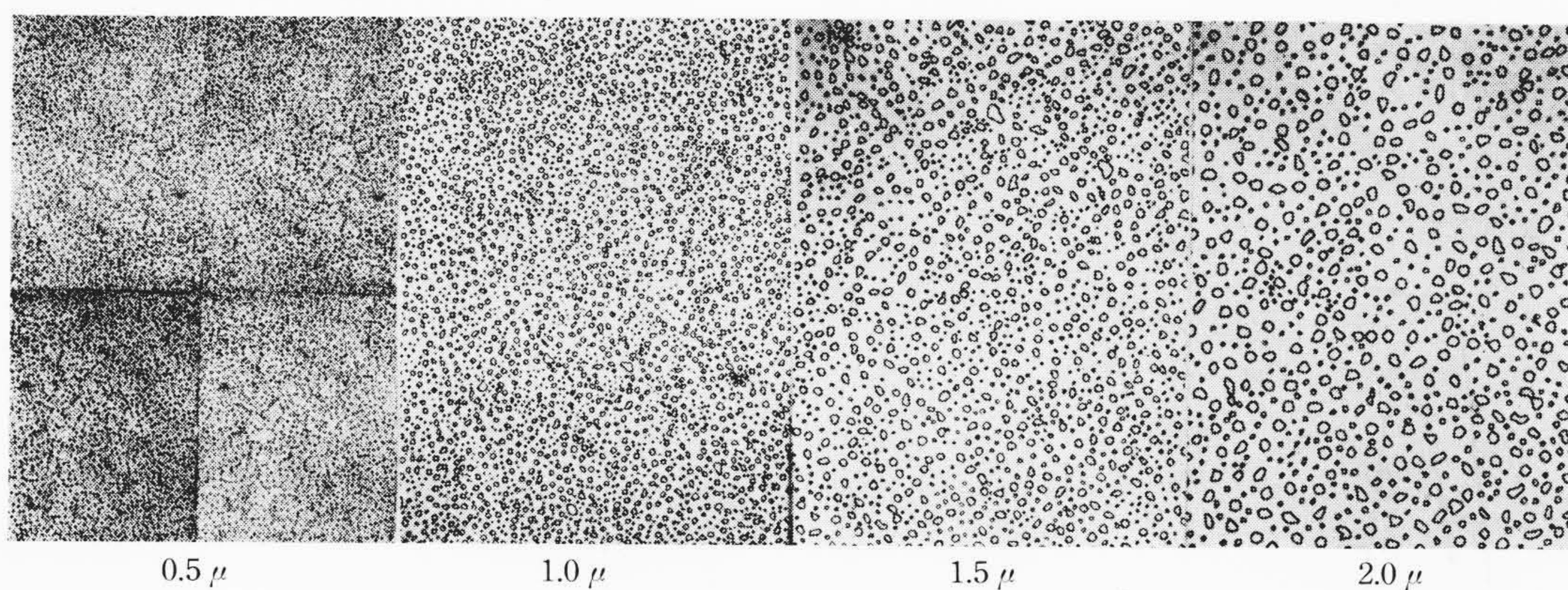
第 12 図 試料 No. ⑫ (SK-2) ×400

トの平均粒度を調べるには近藤氏⁽⁴⁾の方法が発表されているが炭素量に考慮が払われていないので実用的でない。筆者らはこれらの点を勘案し第 17 図に示すような実用的球状セメンタイト粒度標準図を作成した。本図は 1.10% 炭素が全部球状セメンタイトとして基地中に一様に分布した場合で、各粒の占める面積率も考慮してある。なお各数字は標準粒度を示すが、実際に全部の粒状セメンタイトが真球状にしかも粒度がそろい完全に一様な分布を示すことはまずないので、この場合の各標準粒度数はこれまでに得られた最良の球状セメンタイト組織を検討した結果から全粒数の 70% とし、残部は

それ以下すなわち約 1/3 以下の球状セメンタイト数を 30% として示してある。

また球状の形、分布およびある程度の偏析も実際の組織と比較しやすく電子顕微鏡組織その他を参考とし配慮したが、粒度は写真の倍率を変化し正確を期した。

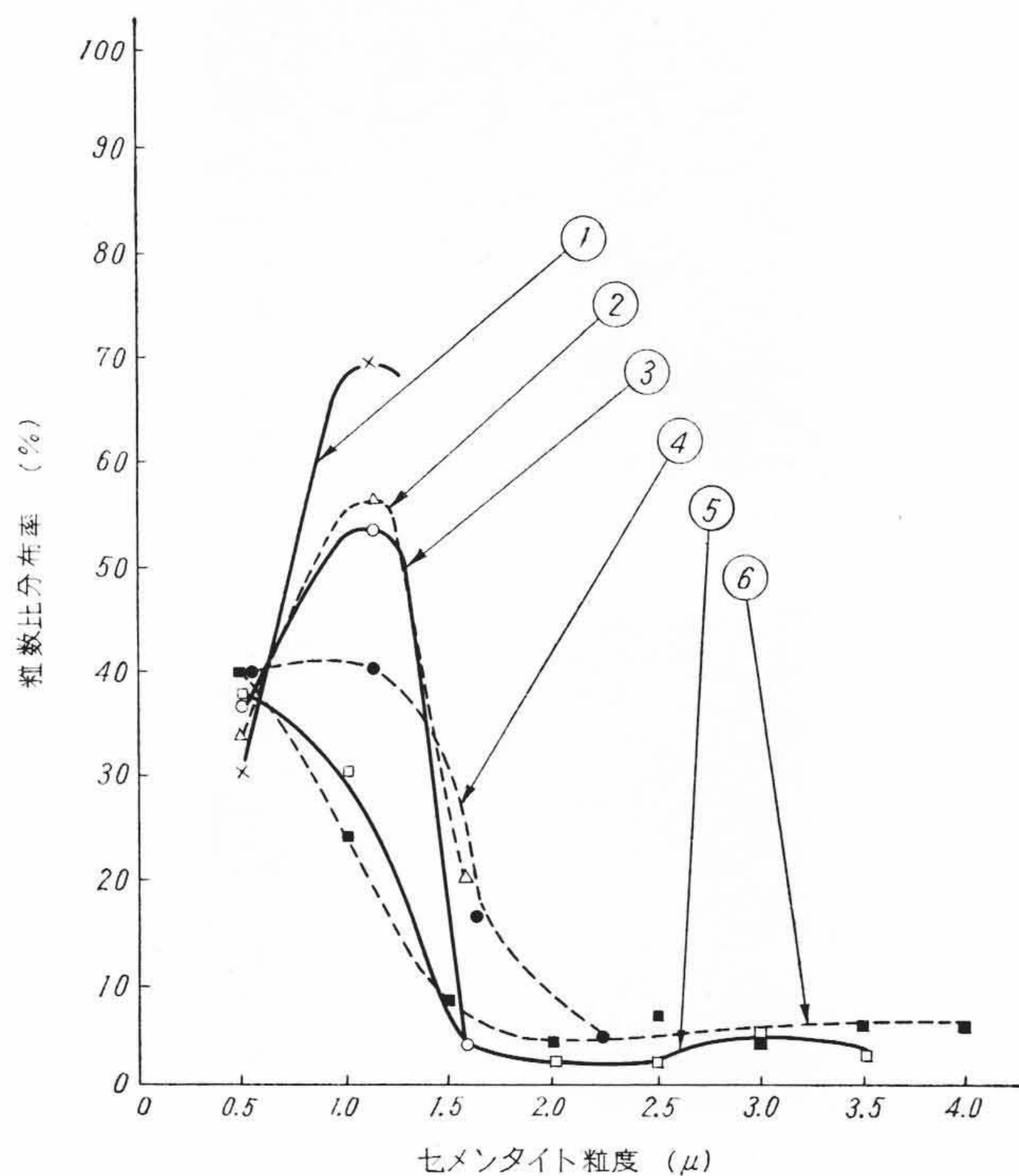
倍率として ×420 を選んだのは現在この種組織の検鏡に採用している当所の顕微鏡の写真倍率に合わせたためで、×400 の場合は本図の 95% と考えればよい。第 17 図は 1.10% 炭素鋼における球状セメンタイト標準図であるが、炭素量が多少変化しても粒度そのも

第13図 試料 No. ③ (白2) $\times 3,000$ 第14図 試料 No. ⑨ (SK-2) $\times 3,000$ 第15図 試料 No. ⑤ (白2) $\times 3,000$ 第16図 試料 No. ⑪ (SK-2) $\times 3,000$ 第17図 C 1.10% 炭素鋼の球状セメントイト粒度標準図 (各標準粒度含有率70%, 倍率 $\times 420$)

のを比較測定する場合、十分活用し得るものである。第18図は砂鉄系試料の各球状化組織を検鏡下および写真と上記粒度標準図とを丹念に比較測定した結果得られたもので、各粒度の球状セメントイトが数量的に何%あるかを示した分布図である。

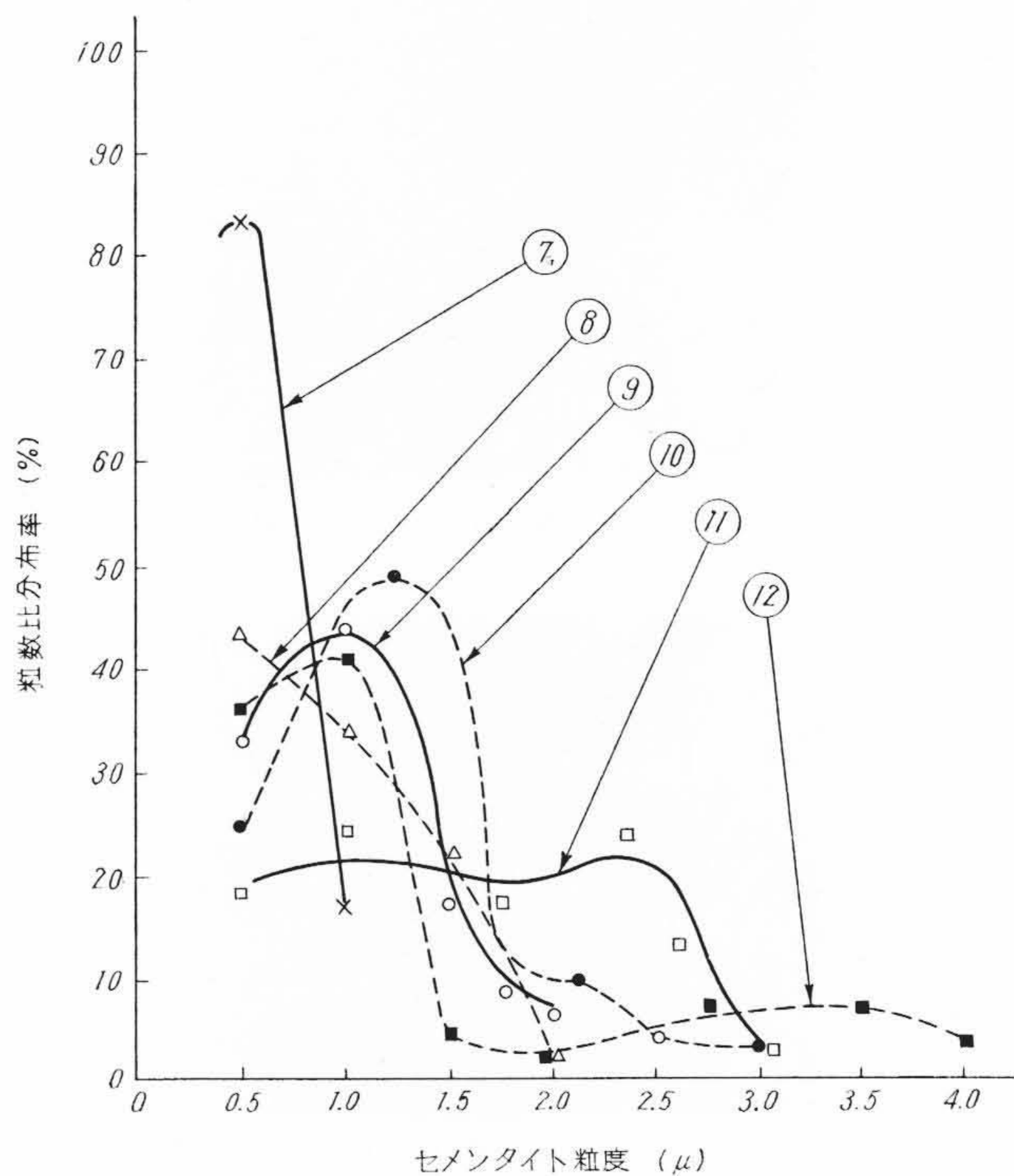
第19図は同様にくず鉄系試料の場合を示したもので、両者ともに球状化法の差異に基づく影響が粒度分布に現われている。すなわち両図ともに粒度が全般的に小なる試料は比較的粒度がそろい当

然粒数も多いが、粗大粒を混える場合(No. ⑤, ⑥, ⑫)は粗大粒数は見かけから感じられるよりは少なく、細粒が多い。しかもその中間粒度の数をもっとも少ないのは注目すべきであろう。原料鉄の差はくず鉄系試料⑦が、同処理をした砂鉄系試料①より明らかに粒度が小さく数が多いことを除き、ほかの球状化処理の場合は全般的に混粒の傾向が大きく、したがって各粒度の数量率は低いことである。以上の傾向は各粒度の数量的な変化から現われたものであるが、熱処



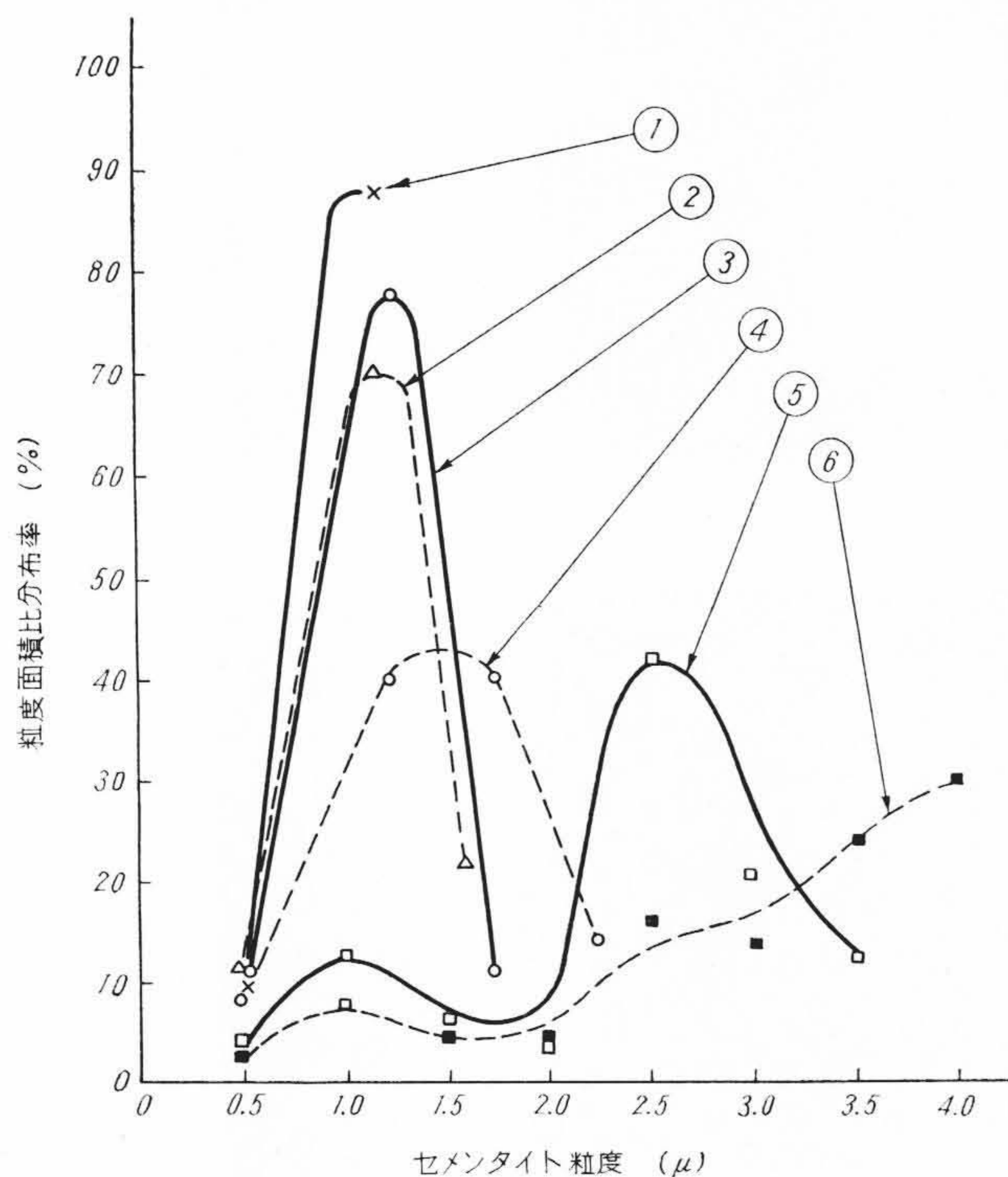
(砂鉄系試料白2の場合)

第18図 セメント粒度と粒数比分布率との関係



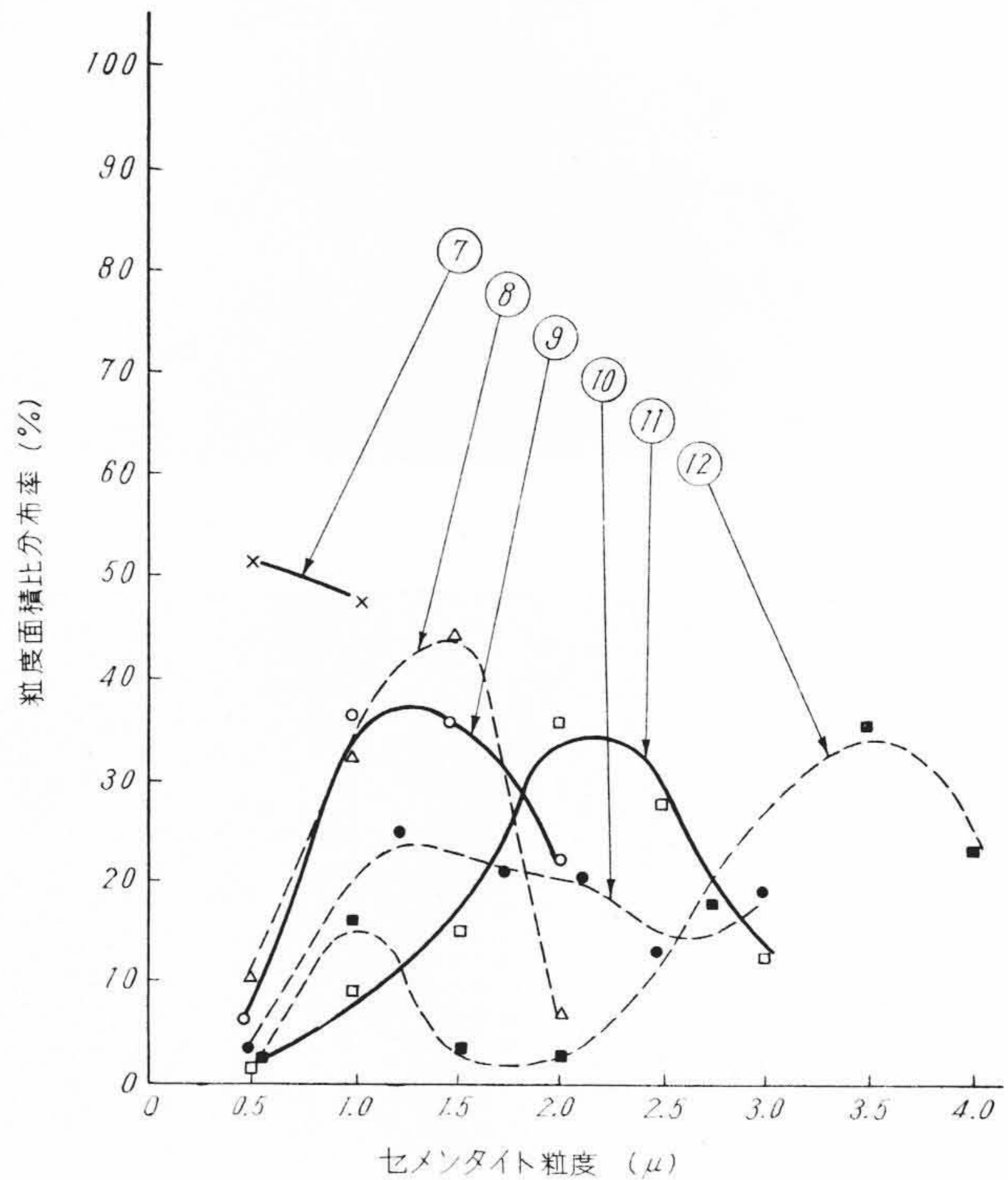
(くず鉄系試料SK-2の場合)

第19図 セメント粒度と粒数比分布率との関係



(砂鉄系試料白2の場合)

第20図 セメント粒度と粒度面積比分布率との関係



(くず鉄系試料SK-2の場合)

第21図 セメント粒度と粒度面積比分布率との関係

理上では各粒の容量が実際には影響するものと考えられる。第20、21図は各粒の面積（この場合は容積と同意義になる）率と粒度との関係について示したもので前図とかなり異なってくる。すなわち粒度の大なるものは数量的に少なくとも容積比は大きく逆に細粒は数がたとえ多くても容積としては小さくなるからである。鋼質的な問題はさておき、組織的に良好な球状セメント（粒状パーライト）組織とは一応粒度がそろって形良く分布も一樣なことが要求されて

いる。いまこれらの点を満足する場合を本図にあてはめると、各粒度の分布曲線が鋭角のパルス状をなし、分布としては正規分布であろうと考えられる。これにもっとも近い分布をなす試料は両図中のNo. ②③の試料でNo. ④と⑧がこれにつぐものと思われる。したがってセメントの粒度分布および形状の点からも砂鉄系試料の比較的低温で球状化処理したものはくず鉄系の場合に比べ良好な球状化組織であるといえる。換言すれば砂鉄系原料鉄から造られた

刃物鋼は、くず鉄系高炭素鋼に比べ明らかに球状化性がすぐれているといえよう。また第20, 21図を比較することにより砂鉄系刃物鋼の方が加熱温度によるフリーセメントイットおよび粒状パーライトの成長速度の大きいこともある程度定量的にわかる。なおこの場合、前述のように粗大粒群と細粒群とに区分され 2μ 前後の中間粒がもっとも少ないことは検討を要する。セメントイット粒度におよぼす研摩法の影響については十分注意⁽⁵⁾した。また研摩面において切断面としての細粒の現出する確率の問題も考えられるがこの点は各試料に共通するもので、さらに各粒は腐食によりかなり浮出しているから⁽⁵⁾理論的な切断面における場合よりは粒度に影響を及ぼさないものと思われる。この点については第15, 16図からも推察できる。したがって粒状セメントイットが成長粗大化する場合は一率に全部の粒が成長することは当然不可能であり、一部のセメントイット粒は成長するがほかのセメントイット粒は α 相または γ 相に拡散固溶して前記セメントイット粒の成長を促進する。すなわち結果的には大きいため固溶しなかった残存粒がほかの細粒を併呑成長した場合に上述の現象を生ずるものと考えられる⁽⁶⁾。この点を明らかにするため高温顕微鏡による観察を試みたが、分解能の関係で確認するに至らなかった。

3.2 靱性試験

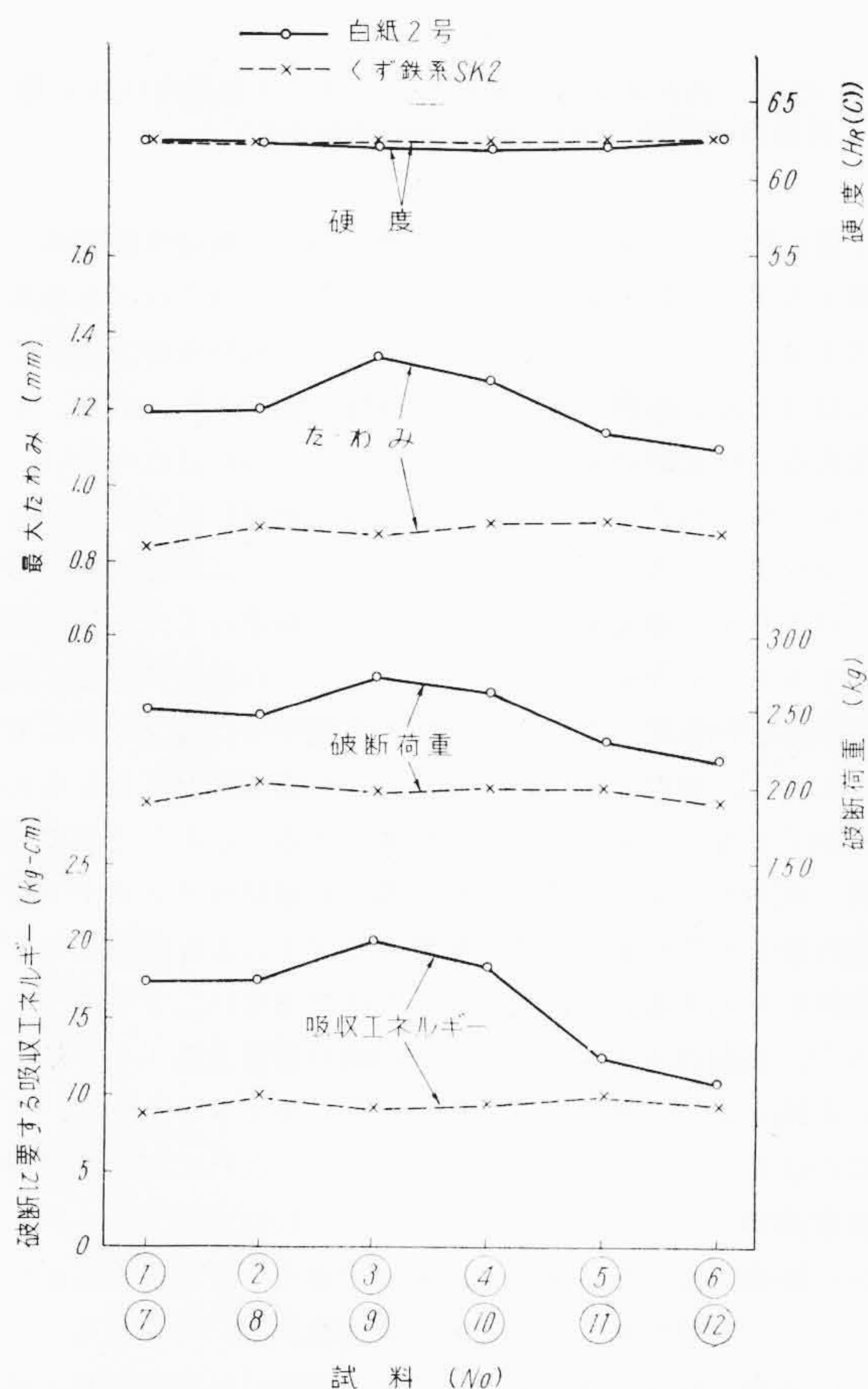
前項の各試料を焼入焼戻処理し静的抗折試験を実施した結果を以下に述べる。第22図は $760^{\circ}\text{C} \times 5$ 分加熱保持後、 20°C の水焼入を行ない、 200°C で30分焼戻した場合の硬度、最大ひずみ、破断荷重および吸収エネルギーと各種球状化処理法との関係を示す。これより硬度は砂鉄系試料のNo. ④がわずかに低いほかほとんど差がないにもかかわらず、そのほかの諸性質、特に吸収エネルギーが明らかに変化していることが認められる。しかも各種球状セメントイット組

織の差異に基づく影響は砂鉄系試料にのみ大きく現われ、 $1 \sim 1.5\mu$ の標準粒度を有していたNo. ③が最も靱性が大きく、粗大粒を有していたNo. ⑥が最も低い。

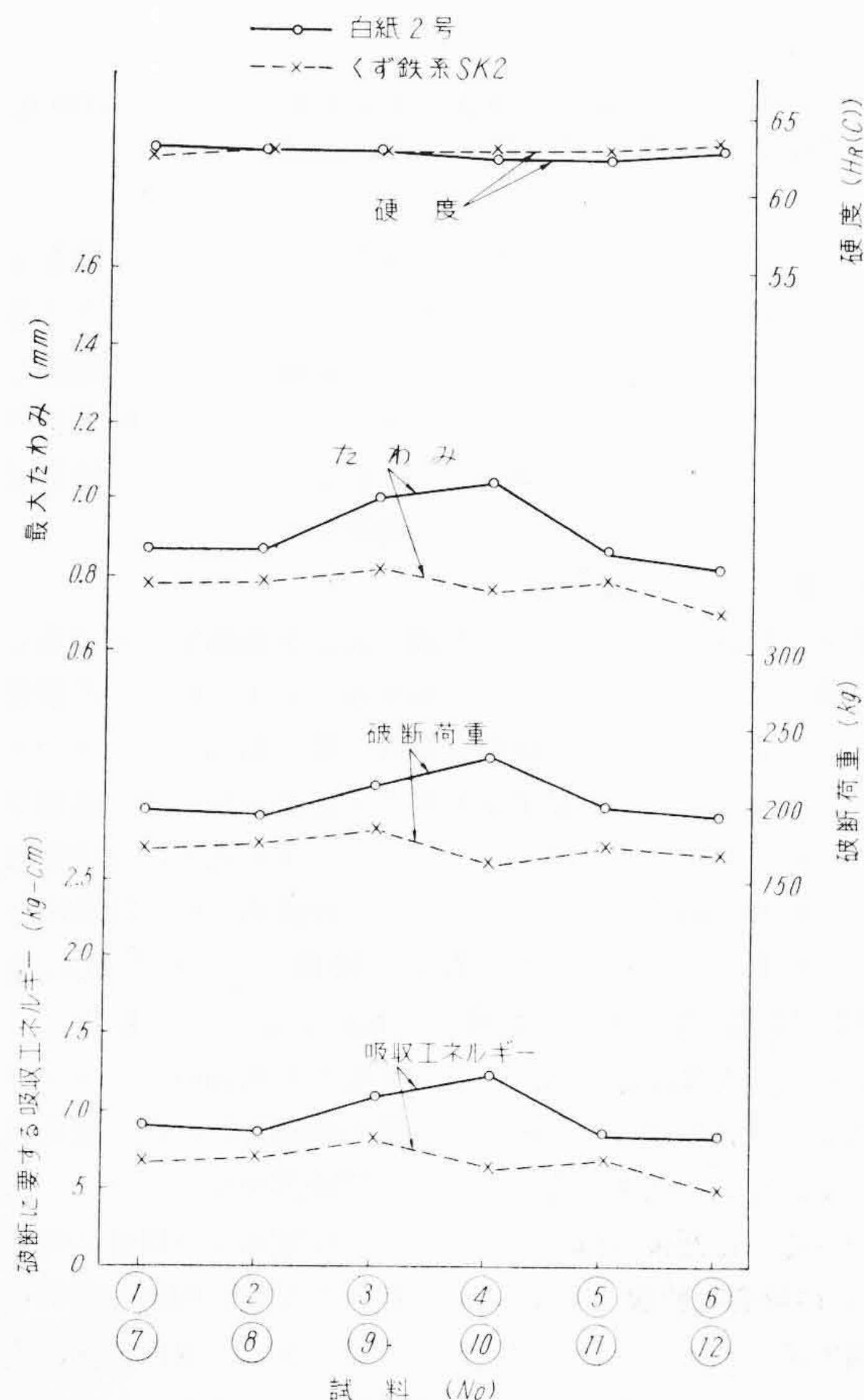
もっともNo. ⑥試料は球状化処理温度が 800°C で基地の結晶粒もやや粗大化した影響もあろう。これに対しくず鉄系SK-2の場合は靱性が明らかに劣り、しかも粒度変化による影響があまりないことは注目される。

第23図は焼入温度のみを変え $800^{\circ}\text{C} \times 5$ 分水焼入、 200°C 焼戻した場合を示す。前図と異なる点は全般に硬度が若干大となって、吸収エネルギーは低下することである。特に砂鉄系試料の焼入温度上昇による靱性低下がいちじるしいほか、最高の靱性を示す焼入前のセメントイット粒度はやや大きく、標準粒度 1.5μ のNo. ④試料に移行している。

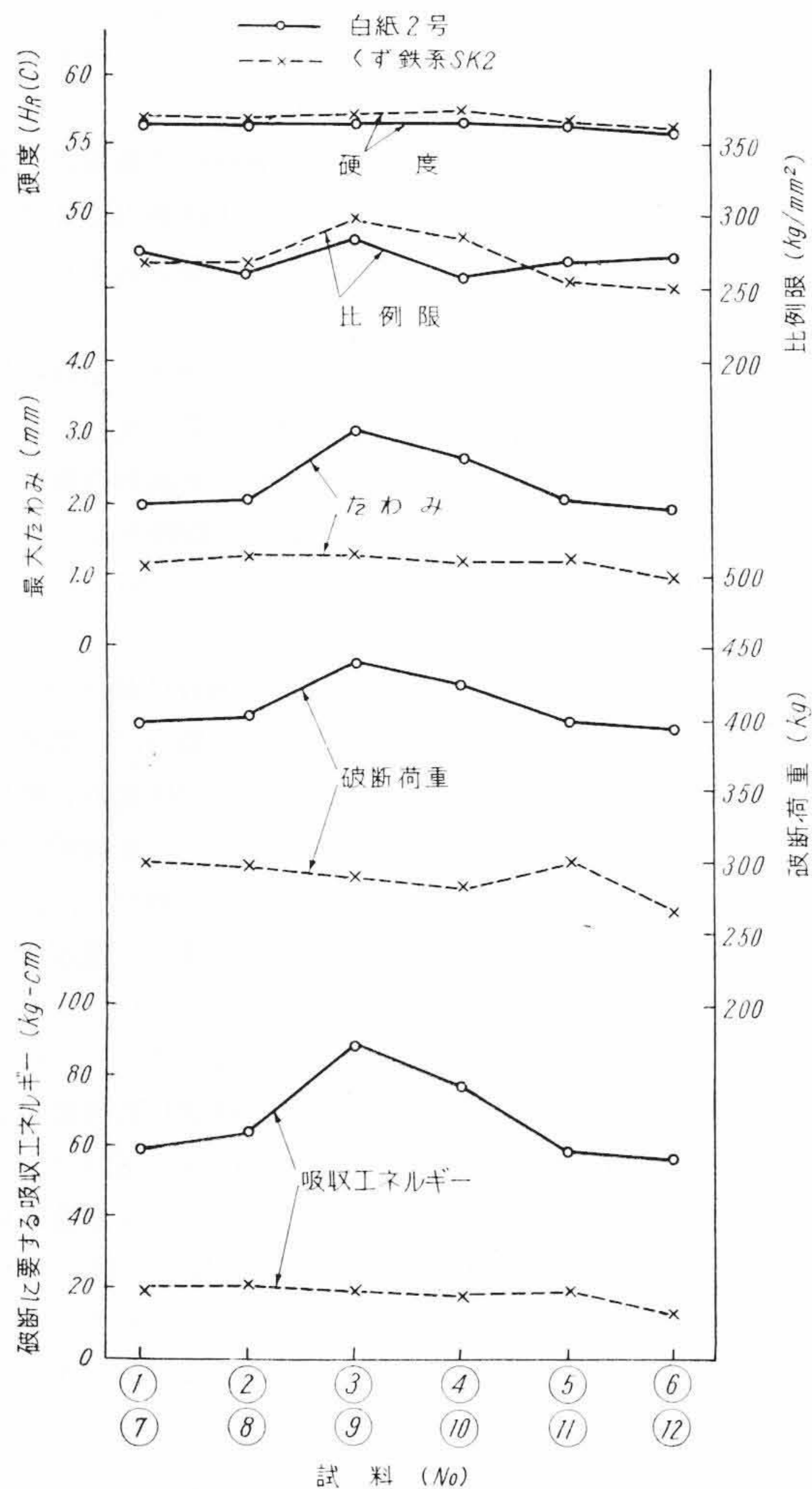
同様に第24, 25図はそれぞれ 760°C および 800°C 焼入後、 300°C に30分焼戻した場合の試験結果である。この場合は一部塑性変形をするので一応比例限もとってある。ただし、弾性変形と塑性変形の間接部の曲線から測定した場合は誤差が多いが、比較的に誤差の少ない弾性変形および、明らかな塑性変形をなす場合と、前報⁽¹⁾との関連上参考のため図示した。両図から焼戻硬度は、焼戻軟化抵抗のやや低い砂鉄系試料がくず鉄系試料よりわずかに小であるが吸収エネルギーすなわち靱性はくず鉄系に比べ格段にすぐれていることは前報⁽¹⁾の結果と同様である。また焼入前の球状化処理法(粒度)の影響についても 200°C 焼戻の場合と同じくNo. ③が最大で、これより細粒または粗粒をおもに含んでいた試料はいずれも靱性が低下する。 800°C 焼入の場合も 200°C 焼戻の場合と同様に全般に靱性を劣下するほか、砂鉄系試料の粒度による変化も緩和されている。いずれの場合もくず鉄系試料は靱性低くしかも球状セメントイット粒度の



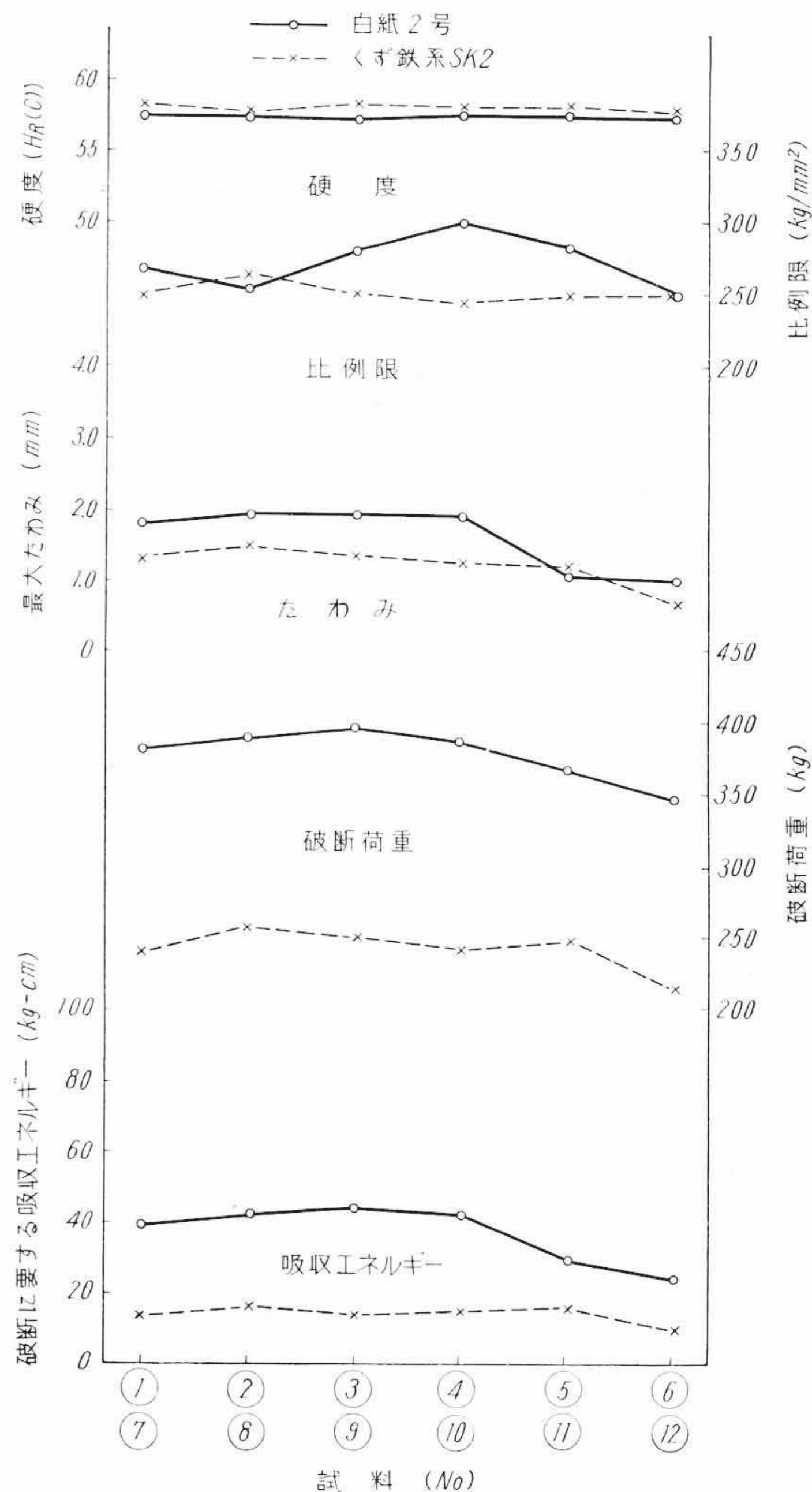
第22図 靱性試験値と球状セメントイット粒度ならびに原料鉄との関係 (760°C 焼入, 200°C 焼戻の場合)



第23図 靱性試験値と球状セメントイット粒度ならびに原料鉄との関係 (800°C 焼入, 200°C 焼戻の場合)



第 24 図 靱性試験値と球状セメントタイト粒度ならびに原料鉄との関係 (760°C 焼入, 300°C 焼戻の場合)



第 25 図 靱性試験値と球状セメントタイト粒度ならびに原料鉄との関係 (800°C 焼入, 300°C 焼戻の場合)

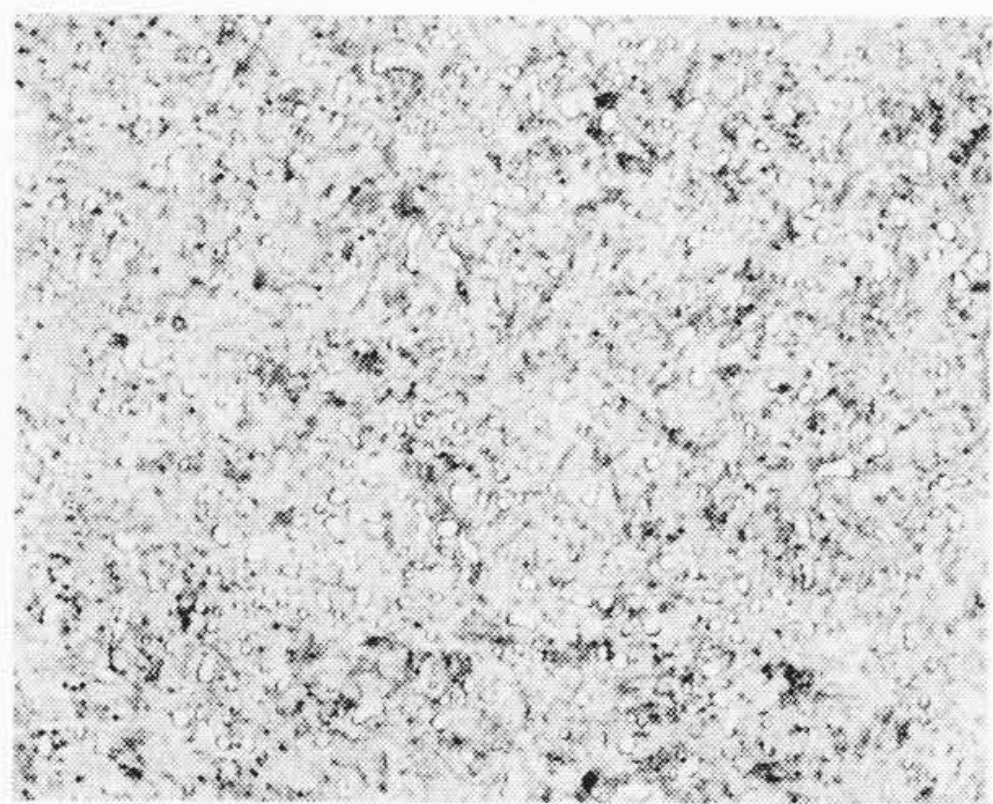
影響が明らかでない。強いて傾向を求めるならば、最も粒度小なるものおよび粗大粒を有していた試料がわずかに靱性を低下するといえる。本実験では焼戻温度はちょうど、組織変化により脆性を示す温度であり、測定値のバラツキ多く球状セメントタイト粒度との関係が明らかでなかったため省略する。ただしこの場合も砂鉄系試料は平均してくず鉄系試料より明らかに靱性が大であった。

3.3 考 察

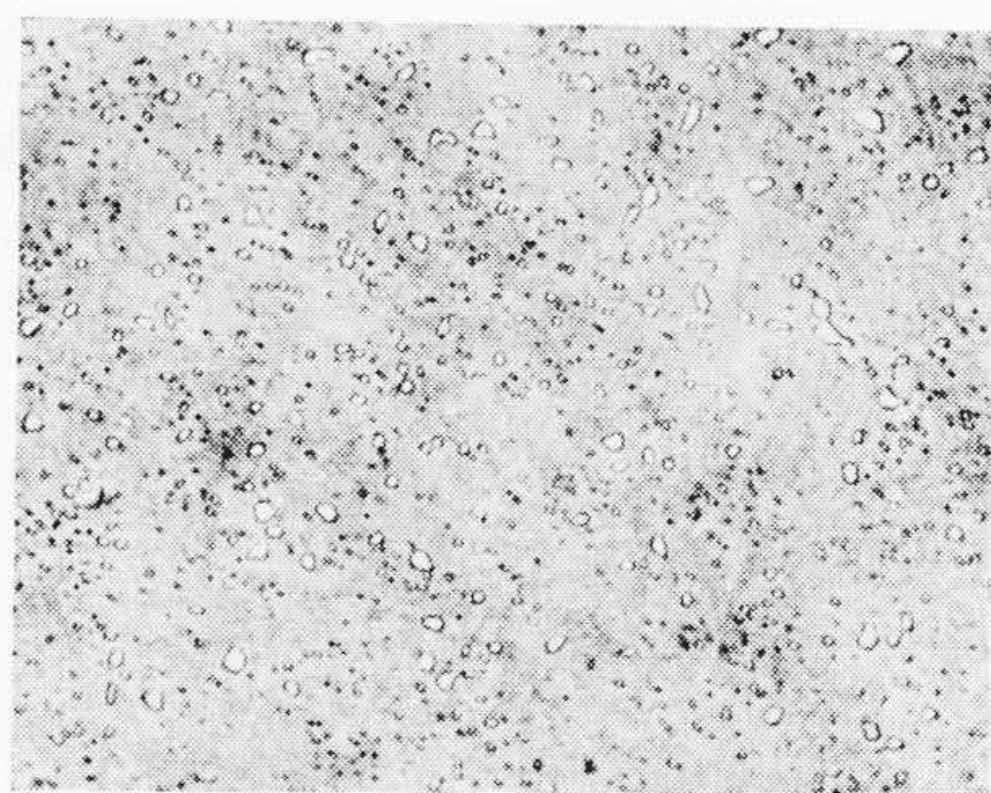
砂鉄系原料鉄から造られた刃物鋼が近似炭素濃度を有するくず鉄系炭素鋼に比べ、すぐれた靱性を有することはこれまでの研究により明らかである。また本実験結果から、焼入前のセメントタイト球状化処理に対する反応も砂鉄系試料がくず鉄系試料に対し敏感であることがある程度定量的に明らかとなった。さらにこの球状化の程度すなわち粒度と靱性との関係についても砂鉄系試料が特異性を有することが判明した。組織的には第 26～29 図の光学顕微鏡組織および第 30～33 図の電子顕微鏡組織から知れるように砂鉄系とくず鉄系両試料間に大差は認められない。すなわち残留球状セメントタイトの形状はいずれの場合も γ 相に周辺部が溶解したため、焼入前の粒度より小さくかつ丸味を帯びており、基地部マルテンサイト組織も同等である。ただ未溶解セメントタイトの粒度および数量に問題があるが、この場合は粒数が少なく、かつ微粒が存在し明瞭でないため焼鈍組織の場合のように定量的比較が困難である。また硬度は実験結果にみられるように各試料間に大差はないといえる。しかし靱性において明らかに大差が存在するのである。いま両者の化学成分を考えてみると前述のように砂鉄系試料はくず鉄系に比べガスその他の

不純元素が明らかに少ない。各不純物の靱性に及ぼす影響については後報するが、不純元素の中には単独に微量含有されてもかなり靱性を劣下せしめるものが多い。したがってこれら有害元素はたとえ単独にはほとんど影響を及ぼさない程度の微量であっても、その合成効果あるいは交絡効果は相当大きいものとみねばならない。

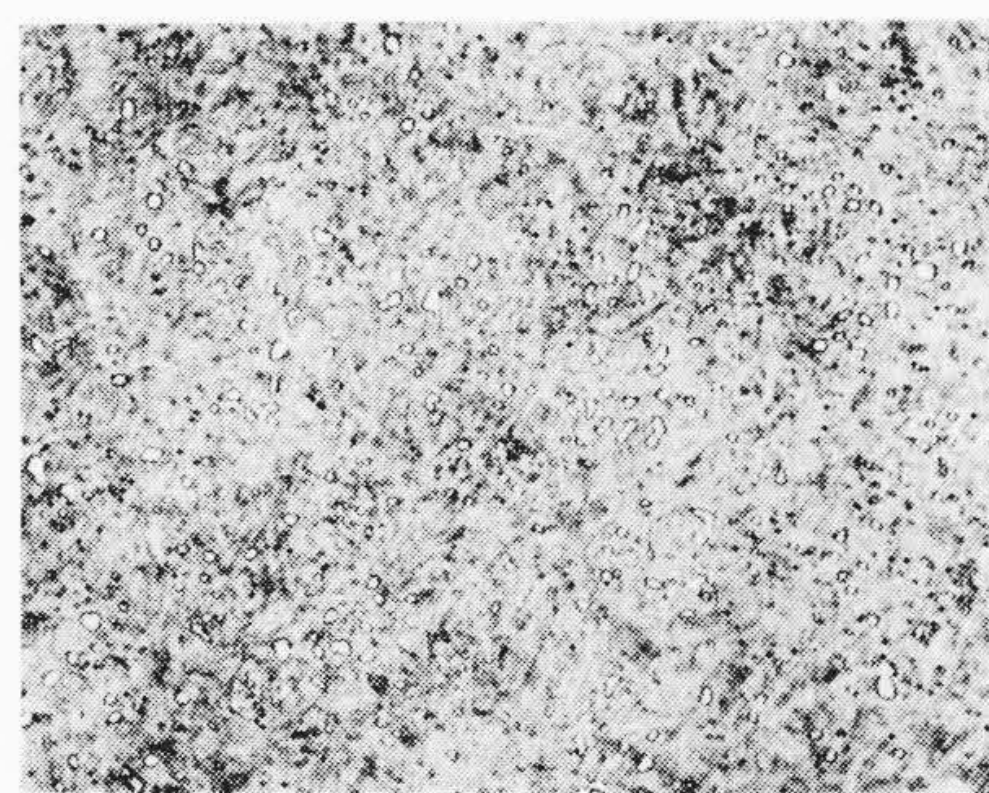
つぎにこれら有害不純元素が結晶粒界に析出し粒界を脆弱ならしめていないかとの考え方がある。これについては別途に検討中であるが、ほとんどの微量元素は焼入加熱中におそらく大部分が基地中に固溶するものと推定される。したがってこの場合に靱性に関係するのは結晶粒内強度である。もし粒内基地中の溶質元素中に有害なものがあれば、他の欠陥たとえば空孔とか格子間原子とともに破壊発生の因子となるであろうことは想像できる。しかして本実験結果より同一成分を有する砂鉄系試料の場合も球状セメントタイト粒度および焼入温度の変化が、靱性に影響を及ぼすことを確認した。すなわち靱性を左右する因子は化学成分だけではない。すでに知られたとおり⁽¹⁾、高温焼入の場合は炭素その他の溶質元素（くず鉄系試料は特に不純元素）を多く含有するマルテンサイトを生成し、さらに結晶粒の成長を促すから脆性になりやすい。これに対し低温焼入では低濃度炭素のマルテンサイトを生じ、これは高炭素マルテンサイトに比べ硬度は低い、未溶解のセメントタイトを残留するから平均硬度としては同等であるにもかかわらず靱性が高いのであろう。すなわちこの場合の靱性を決定するものは結果的には基地硬度と残留炭化物の存在状態であり、それ以前の原因としては炭化物の状態、すなわち焼入前のセメントタイトの球状化条件と熱処理法があげられる。



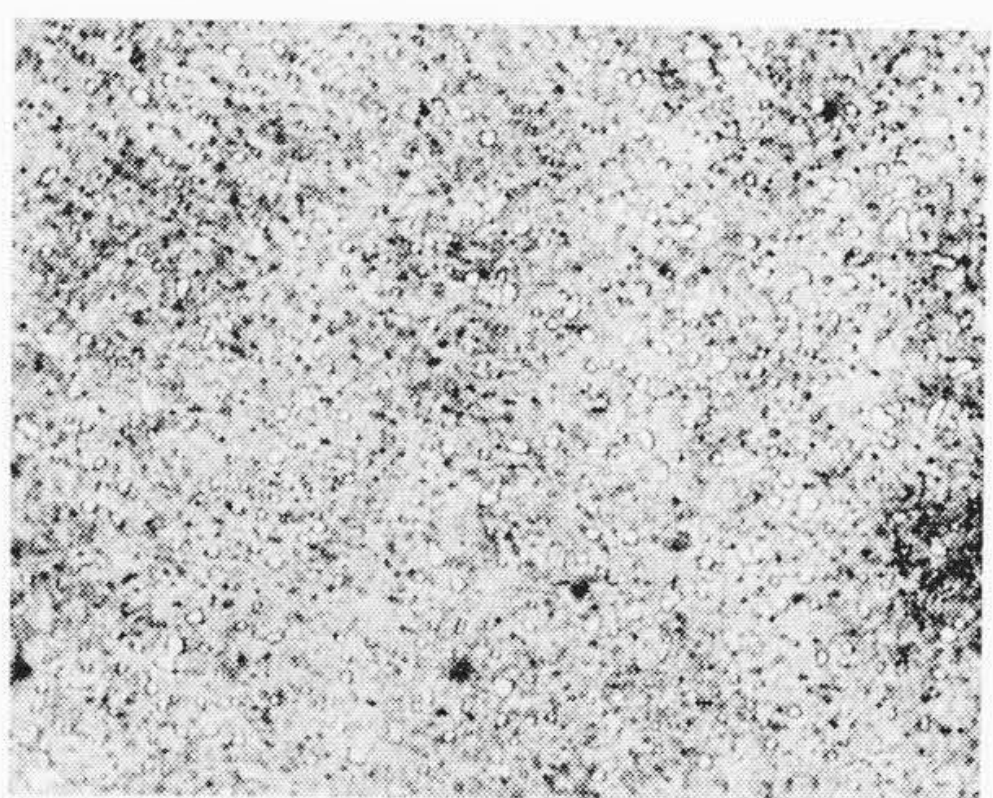
第26図 試料 No. ③ 白2の760°C焼入200°C焼戻組織 (×400)



第27図 試料 No. ⑨ SK-2の760°C焼入200°C焼戻組織 (×400)



第28図 No. ③ 白2の800°C焼入200°C焼戻組織 (×400)



第29図 No. ⑨ SK-2の800°C焼入200°C焼戻組織 (×400)



第30図 第26図の電子顕微鏡組織 (×3,000)



第31図 第27図の電子顕微鏡組織 (×3,000)



第32図 第28図の電子顕微鏡組織 (×3,000)



第33図 第29図の電子顕微鏡組織 (×3,000)

これらの靱性を支配する根本的な因子およびその機構については鋭意検討中であり、近くその詳細について報告する予定である。

4. 結 言

以上の実験結果を要約すればつぎのとおりである。

- (1) 球状セメントイト粒度判定用として実用的な粒度標準図を作成した。
- (2) この粒度標準図を用い実際の球状化組織における粒度分布をある程度定量的に測定し、砂鉄系刃物鋼はくず鉄系高炭素鋼に比べ、球状化性の良好なことを立証した。
- (3) 靱性に及ぼす球状セメントイト粒度の影響は特に砂鉄系刃物鋼に顕著に現われ、1~2 μ の粒度を均等に有する場合がもっとも良好である。
- (4) 焼入温度の影響はセメントイト粒度および原料差に関係なく明瞭に現われ、低温焼入が靱性を増大せしめる。

- (5) 同じく粒度変化および熱処理条件のいかに問わず、あらゆる場合に砂鉄系刃物鋼はくず鉄系炭素鋼より格段にすぐれた靱性を有することを確認した。

最後に本研究を遂行するにあたり、終始ご指導をいただいた小柴所長に感謝の意を表す。

参 考 文 献

- (1) a 小柴, 菊田, 守谷: 安来研究報告第1,064号 (33-4)
- (1) b 小柴, 菊田, 守谷: 日立評論, 金属特集号第4集, 37 (34-12)
- (2) 菊田, 守谷: 安来研究報告第1,121号 (34-3)
- (3) a 吹野, 橋本, 重本: 安来研究報告第935号 (31-8)
- (3) b 吹野, 橋本, 重本: 日立評論, 39, 8, 951 (32-8)
- (4) 近藤: 日本金属学会誌, 11, 9, 17 (22-9)
- (5) 菊田, 守谷: 日立評論, 39, 4, 509 (32-4)
- (6) たとえば近藤: 日本金属学会誌, 8, 4, 175 (19-8)
- (7) 近藤: 日本金属学会誌, 7, 2, 50 (18-2)