

# 炭素鋼の冷間塑性加工における潤滑作用に及ぼす下部組織の影響

時沢 貢・室谷和雄

## The Effects of the Metallic Structures on the Friction and Lubrication in the Cold Deformation Processing of Carbon Steel

Mitsugu TOKIZAWA・Kazuo MUROTANI

This paper describes the results of a detailed study on the development of surface asperities, under cold compression condition of the pure-iron and carbon-steel which have various grain-sizes.

The frictional power occurring between the metal-tool interfaces being directly measured, it is found that the materials of large grain-sizes have greater frictional resistance, and that this phenomenon is most remarkable in the case of the high carbon-steel.

### 1. 緒言

一般に金属材料を冷間で塑性加工するとき、潤滑剤を用いて摩擦を減少させ、加工表面の焼付きを防止し、さらには加工材料の加工限界、製品の精度および加工表面の仕上げ状態などの向上が要求されるようになった。これらの目的を達成させるには、まず、金属材料に対する適正な潤滑方法のもとで、塑性加工が行わなければならない。これまでの数多くの研究は加工表面のあらさの解析から説明しようとした試みが多く、主としてレオロジー的な立場から追求されてきた。ところが、加工を受ける材料はそれぞれ異った金属組織と変形抵抗を有し、加工中に刻々と変化する。このことを考慮すれば材料の外側からのごく表面的な観察の解析結果だけでは理解しがたく、さらに材料の内側(下部組織)からみた加工表面のあらさと金属組織との関連についても調べれば、加工性及び潤滑作用の良好な加工前における材料の金属組織と強度(かたさ)に対する改良も可能になると思われる。

前報<sup>(1)</sup>は純金属を主体とした面心、体心及びちゅう

密六方格子金属の潤滑圧縮を試み、潤滑剤は隣接結晶粒間の結晶方位差によって生じた粒界付近の大きくぼみとすべり帯に起因した微細くぼみに閉込められ、なかでもすべり系の少ないちゅう密六方格子金属は、他の格子金属に比較してくぼみ量が小さく潤滑作用の悪いことがわかった。そこで本報は純鉄とその合金として構造用炭素鋼を用い、結晶粒径と第2相の球状化処理が潤滑作用に及ぼす影響を調べ、被加工材料の立場からその性質を変えることによって潤滑効果が良くなることを報告し、ついでその機構を実験的に明らかにした。

### 2. 実験方法

実験に用いた試料は主として工業用純鉄と炭素鋼(S 20C、S 40C、S 55C)で化学組成の主な内容は表1に示した。金属組織は加工と熱処理の組合せによって3~4種類の異なった結晶粒径と、第2相のパーライトが球状化したものと層状パーライトである。

図1はこれらの加工熱処理による金属組織の異なった試料の圧縮変形抵抗曲線を示した。結晶粒径が

炭素鋼の冷間塑性加工における潤滑作用に及ぼす下部組織の影響

表1 供試料  
(a) 化学組成

材料	主な化学成分 (%)						
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr
工業用純鉄 SUYBO	0.01	0.14	0.07	0.008	0.012	0.02	0.01
構造用鋼 S 20 C	0.21	0.31	0.55	0.026	0.039	Tr	0.01
構造用鋼 S 40 C	0.40	0.24	0.72	0.010	0.016	Tr	0.06
構造用鋼 S 55 C	0.51	0.27	0.84	0.018	0.018	Tr	0.13

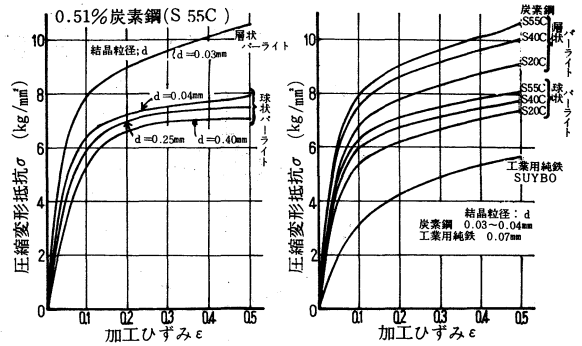


図1 圧縮変形抵抗に及ぼす金属組織の影響  
(使用潤滑剤; ジョンソンワックス #150)

(b) 加工と熱処理による諸性質

処理方法	SUYBO		S 20 C		S 40 C		S 55 C		金属組織	
	ビッカース かたさ Hv	結晶粒径 d (mm)	ビッカース かたさ Hv	結晶粒径 d (mm)	ビッカース かたさ Hv	結晶粒径 d (mm)	ビッカース かたさ Hv	結晶粒径 d (mm)		
5% 冷間 圧縮 後	710 °C 100 時間 焼なまし	73.4	1.15	107.4	0.40	106.7	0.41	105.6	0.40	球状 パーライト
	710 °C 6 時間加熱後 330 °C まで炉冷 5 時間 加熱後空冷	79.0	0.36	106.9	0.26	106.3	0.25	106.6	0.25	
	710 °C 36 時間 焼なまし	80.4	0.29	154.3	0.03	165.7	0.04	171.4	0.04	
710 °C 5 時間焼なまし	87.9	0.07	181.1	0.03	206.4	0.03	225.6	0.03	層状 パーライト	

\* 熱処理はすべて真空中で行った。

小さくなれば、変形抵抗が大きくなることは純鉄及び炭素鋼でも同様であり、また、第2相が球状化すれば層状よりも変形抵抗が小さくなる。

試料寸法は直径15mm、高さ7.5mmの機械加工により作製した円柱試料で、圧縮加工前の試料端面は全て約 0.2μ Rmax以下の平滑面となるようにラッピング仕上げをした。圧縮変形には30 tアムスラー形万能材料試験機を使用し、約0.5mm/minの静的な冷間圧縮を行った。圧縮用工具は焼入れ工具鋼で、ロックウェルかたさHRC60、加工面は0.1μRmax以下のラッピング仕上げで、試料と共に実験ごとにこの操作を繰返して清浄な面を保つようにした。

使用した潤滑剤は潤滑作用の比較的良好とされている半固体状のジョンソンワックス # 150と固体状のテフロンフィルム (厚さ0.05mm) を選んだ。また潤滑作用の評価は、著者の一人がさきに発表した図2に示す中央圧板方式により、摩擦力Fと圧縮荷重Pとの測定値の比F/P値と図3に示す Talysurf Model 3 を用いて測定した加工表面の中心線平均あ

らさRaと、記録した断面曲線からその頂点を接点として結んだ直線によってかこまれるくぼみの面積などによった。また、潤滑圧縮された加工表面の観察には、加工後ただちに試料をアルコールとベンジン中に浸漬して、付着した潤滑剤や汚物を十分拭い、乾燥後、その表面をそのまま光学顕微鏡で直接観察する方法によった。

3. 実験結果及び考察

工業用純鉄の潤滑作用に及ぼす結晶粒径の影響は図4によって明らかごとく、細粒は粗粒に比べて摩擦が小さく良好な潤滑が行われていることがわかる。そこでこの理由を写真1の加工表面の観察写真によって検討した。写真の黒色に見える部分はくぼみ部であり、白色部は工具面によって平坦化された部分であって、潤滑剤はこのくぼみ部に閉込められる。結晶粒径の小さい0.05mm試料では、連続した黒色部が一面に認められるが、0.36mm試料では白色部が広がり、全面的に平坦化していることがわか

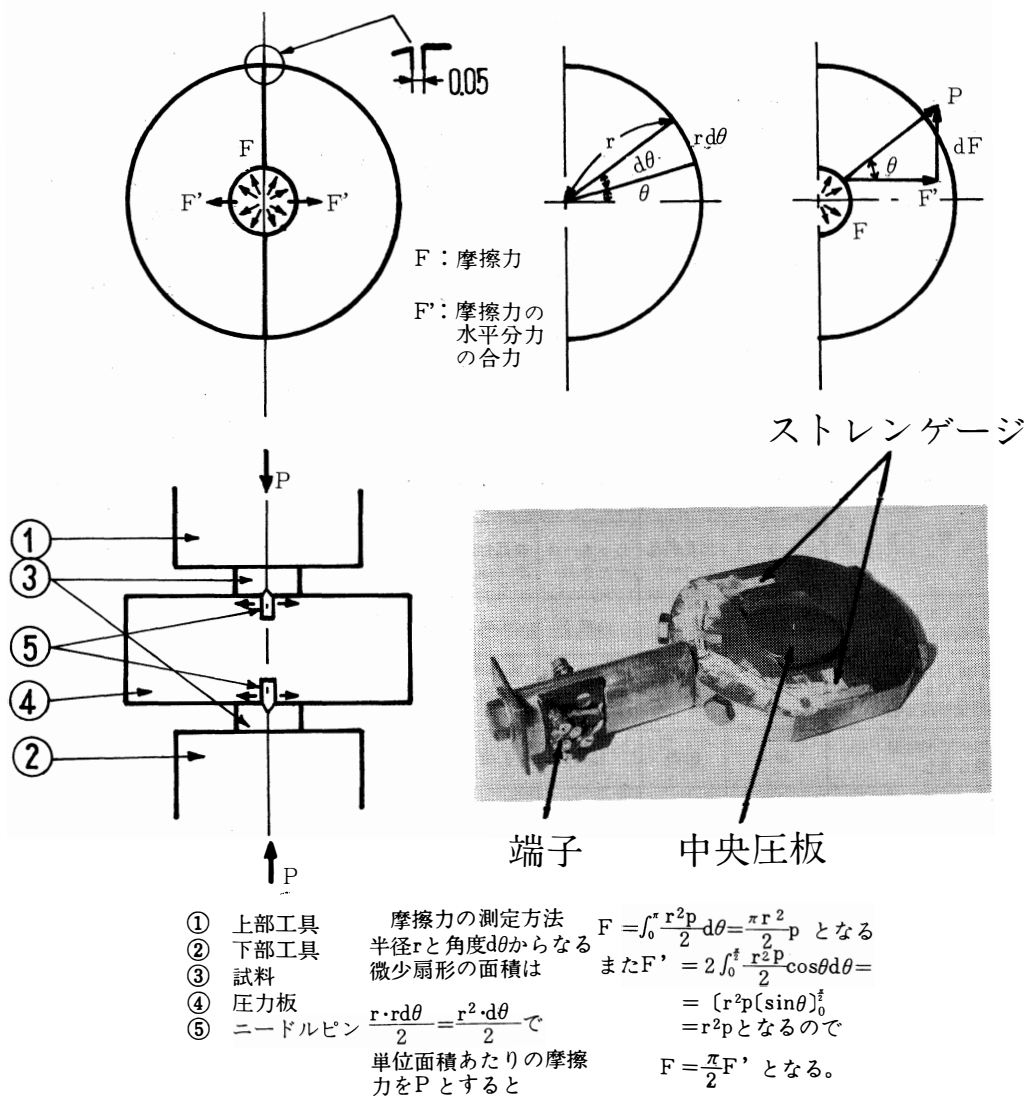


図2 摩擦力の測定装置および原理

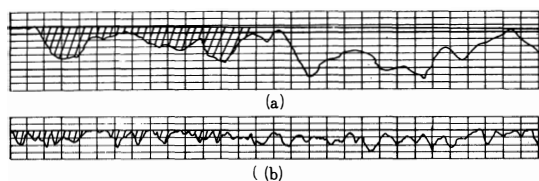


図3 潤滑圧縮した加工表面の断面記録曲線から二次元的な潤滑剤の閉込め量の決定方法  
(使用潤滑剤;(a)テフロンフィルム (b)ジョンソンワックス#150)

る。そこで、くぼみ部をもっと詳細に観察したさき<sup>(1)</sup>の報告によれば、結晶粒界がくぼみに相当し、原因は隣接結晶粒間の方位差が、圧縮加工によって異方向

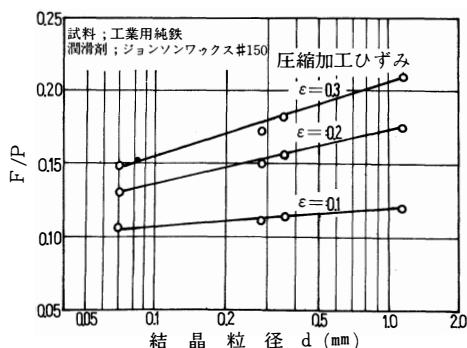


図4 摩擦力と荷重の比F/P値に及ぼす結晶粒径の影響

炭素鋼の冷間塑性加工における潤滑作用に及ぼす下部組織の影響

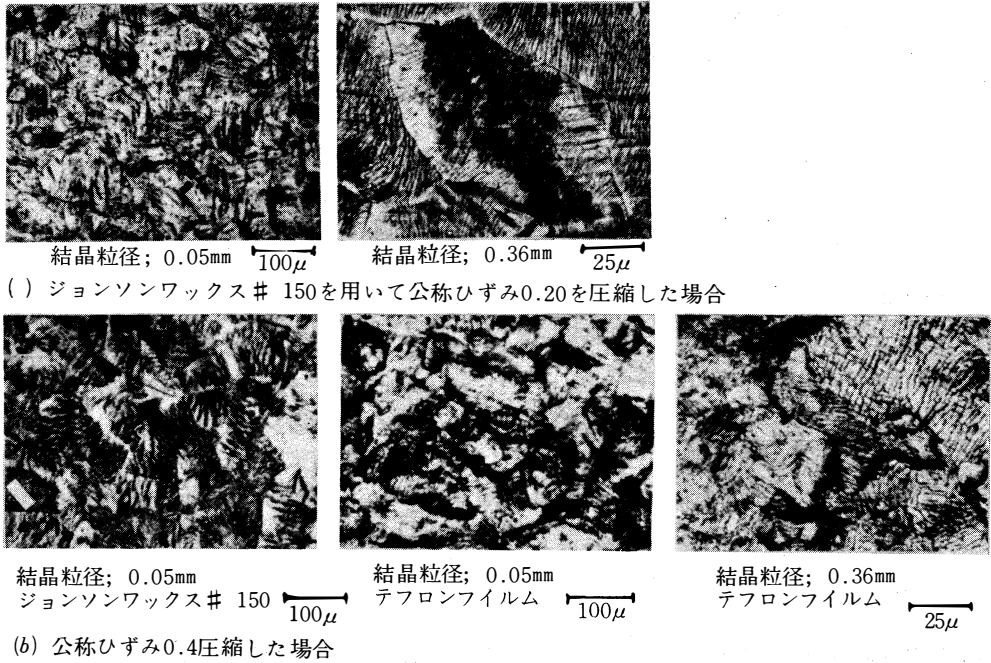


写真1 潤滑圧縮した工業用純鉄 ( $\alpha$  鉄) の加工表面凹凸模様には及ぼす結晶粒径の影響

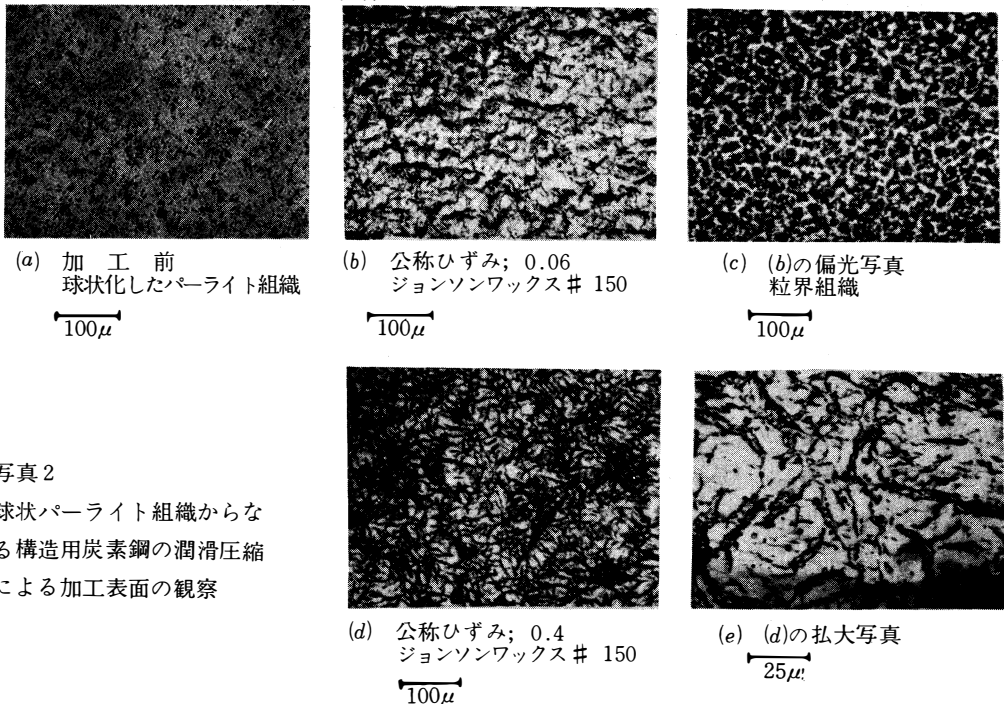


写真2

球状パーライト組織からなる構造用炭素鋼の潤滑圧縮による加工表面の観察

すべりを生じることによって結晶粒間に不均一変形を与え、これによって凹凸が発生した。したがって、結晶粒界の3重点にくぼみが集中するので微細な結

晶粒ではその数が増えて潤滑作用が良好となる。また、公称ひずみ0.4 圧縮した同じ結晶粒径試料の潤滑効果では、テフロンフィルムの方がジョンソン

ワックスよりも著しい凹凸現象を示している。

次に構造用鋼のパーライト組織が潤滑作用に及ぼす影響を調べるため、加工熱処理によって球状化して均一分布している場合と、粒界に層状として析出している場合について調べた。写真2の(a)は球状化処理をした加工前の顕微鏡写真で、(b)~(e)はジョンソンワックス #150を用いて圧縮した加工表面の観察結

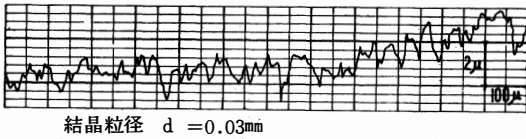
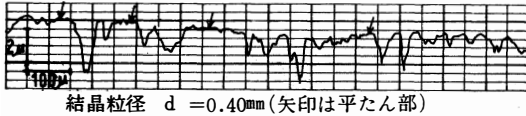


図5 球状パーライトからなる炭素鋼(S 20C)の加工面あらかの形状と結晶粒径(ジョンソンワックス#150, 加工ひずみ0.3)

果である。加工初期の写真(b)では粒界部が黒色に見えるが、これを写真(c)の偏光でみるとちょうど白色にみえて網目状にくぼんだ粒界組織であることがわかり、粒界付近が潤滑剤の閉込めになっている。また、この結果を写真1の純鉄の場合と比較すれば、くぼみは粒界部に集中し、第2相の析出物のため粒内のすべりが拘束されるようになり、さらに拡大した写真(e)でみると、結晶粒内は平坦化して白色にみえ、その内部には球状パーライトが点状に露出している。したがって均一分散した球状パーライトは潤滑作用を妨げていることがわかる。図5は結晶粒径0.40mmと0.03mmからなるS 20Cの球状パーライト試料を加工ひずみ 0.3圧縮した加工表面の断面記録曲線を示した。粗い結晶粒径では矢印の工具と接触して平坦化した部分が認められるが、結晶粒径の小さい  $d = 0.03\text{mm}$  の場合、細かい凹凸曲線となりくぼみの連続が確認できる。

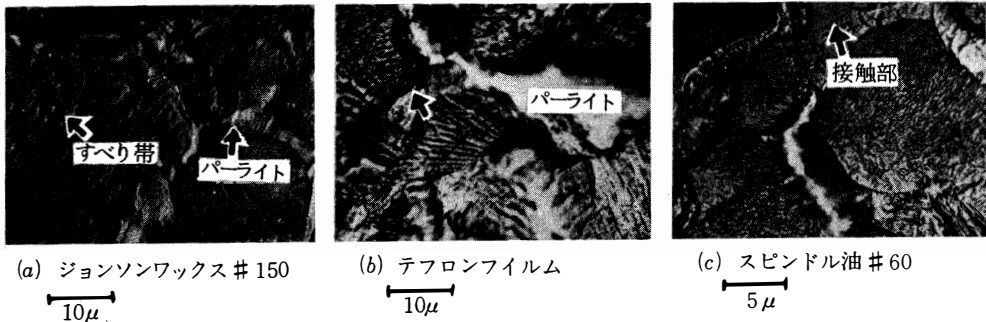


写真3 層状パーライト組織からなる炭素鋼 (S 20C) の潤滑圧縮による加工表面の観察 (公称ひずみ ; 0.4)

写真3は層状パーライトが粒界に分布している試料の加工表面の観察結果を示した。(a)および(b)に示すように粒界に分布していたパーライト部は山形にとっ起し、その中間の地質のフェライト部には微細なすべり帯が発生した底面で、一見盆地のようにくぼんでいる。それで、図6はS 55Cについて層状パ

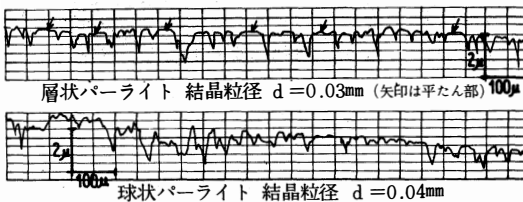


図6 潤滑圧縮した炭素鋼 (S 55C) の加工表面 (ジョンソンワックス # 150, 加工ひずみ0.3)

ーライトと球状パーライトの潤滑作用を加工表面の記録曲線から比較した結果を示した。層状パーライトは潤滑圧縮によって突起するので、潤滑剤の閉込めは主として粒内に集中するが、球状パーライトでは純鉄に類似した粒界くぼみとなるため、結晶粒径が小さくてパーライトの分布量が少なければ、くぼみ量は多くなるが、同じ結晶粒径でも分布量が多くなればくぼみが少なくなり、潤滑作用が悪くなることが予想できる。そこでこれらの結果をさらに定量的に把握するため図7に示したF/P値—加工ひずみ曲線によって検討した。摩擦作用をF/P値で評価すれば純鉄及び炭素鋼のいずれの粗粒も細粒よりは高い値となり、加工が進行すれば、炭素鋼は純鉄よりも低い値となるが、これにはパーライトの分布

炭素鋼の冷間塑性加工における潤滑作用に及ぼす下部組織の影響

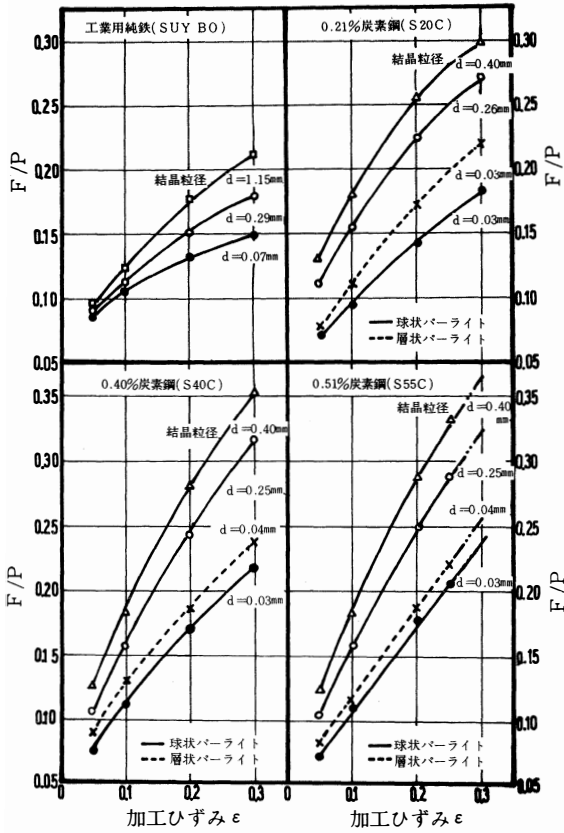


図7 加工過程における摩擦力と荷重の比  $F/P$  値の変化に及ぼす金属組織の影響(使用潤滑剤; ジョンソンワックス #150)

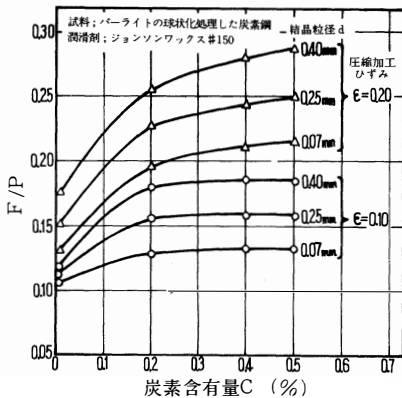


図8 摩擦力と荷重の比  $F/P$  値に及ぼす炭素量の影響(図中の結晶粒径  $d$  は図4の  $F/P-d$  曲線から挿した値)

量が影響していることは明らかである。また同じ結晶粒径でも層状パーライトは球状パーライトよりもやや高い値を示し、球状化の効果は潤滑作用にも影

響している。また、図7の結果をさらに検討するため、図8は横軸に炭素含有量(厳密にはパーライトの分布している体積率で表わすべきであるが)を選び、任意のひずみに要する  $F/P$  値を縦軸で調べた。低加工ひずみの0.10では炭素含有量には余り関係なく、やや一定した  $F/P$  値を示すが、加工ひずみが0.2になると摩擦作用が大きくなる傾向がみられる。この理由は、さきの写真2によって説明できる。加工初期では写真2(b)のように結晶粒径に依存した潤滑作用となるが、加工が進行すると写真2(d)でみられたようなパーライト量の拘束が潤滑作用の妨げとして働くからである。また、続いて潤滑圧縮をした試料を加工表面の中心線平均あらさ値  $Ra$  と断面曲線から求めたくぼみ面積  $S$  によって摩擦作用を評価す

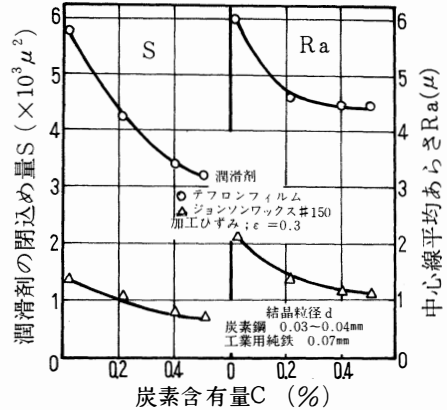


図9 潤滑圧縮した純鉄および各種炭素鋼の加工表面

れば図9のような結果が得られる。炭素含有量が多くなるにつれて表面あらさ及び閉込め量が共に減少する傾向は、さきの図8で示した  $F/P$  値の増加と合せて考察すれば、潤滑作用が悪くなることを意味する。この原因については、これまでの実験結果である地質と第2相の分布に関する金属組織との対応によって説明できる。また、潤滑剤については固体状のテフロンフィルム (PTFE) は半固体状のジョンソンワックス #150よりも潤滑作用が良好であることは、図9の結果と写真1及び写真3を参照すれば明らかであり、加工表面の凹凸化に原因している。したがって、現在鋼の冷間鍛造用潤滑剤として、固体状のリン酸皮膜処理法が適用され、加工限の向上に寄与していることも理解できる。

#### 4. 結 言

純鉄及び炭素鋼を冷間加工するとき、摩擦を小さくして潤滑作用を良好にし、かつ加工力の低減できる要因は、被加工材料の立場から検討して以下のように要約できる。

(1) 結晶粒径の小さい純鉄は、大きい純鉄に比べて潤滑作用が良好であることは、加工表面の金属組織に対応したあらさ曲線とその解析結果及び摩擦力の評価によって明らかにできた。

(2) 地質の結晶粒界に層状パーライトが析出した炭素鋼では、潤滑剤はパーライトの突起した結晶粒界の谷間である粒内くぼみに閉込められるが、球状パーライトの均一分散した炭素鋼では連続した結晶粒界付近のくぼみに閉込められる。

(3) 地質にパーライトの分布量が増加すれば純鉄よりも潤滑作用は著しく減少するのは、結晶粒内のすべり変形が拘束させるためでくぼみ量が小さくなる。

(4) 結晶粒径が潤滑作用に及ぼす影響は、地質に硬質のパーライト相が分布した炭素鋼においても純鉄と同様な潤滑挙動を示し、細粒でしかもパーライト相が均一分散した炭素鋼では低い加工力となり、良好な潤滑作用が期待できる。

#### 参考文献

- 1) 時沢 貢、室谷和雄  
富山大学工学部紀要第26巻P. 39 (1975)