

論 文

硫黄快削鋼の冷間加工性におよぼす Zr 添加の影響*

荒川 武二**・山本 俊郎***・相沢 武**

Effects of Zr Addition on the Cold Workability of Resulphurized Steels

Takeji ARAKAWA, Toshiro YAMAMOTO, and Takeshi AIZAWA

Synopsis:

Effects of Zr addition of up to 0.2% on the cold workability of low carbon resulphurized steels, containing up to 0.2%S are investigated in spheroidized and banded structures. Although a remarkable improvement of the compressive ductility is observed in Zr treated spheroidized steels with increasing Zr/S ratio in steel, Zr addition has no effect on the compressive ductility of annealed steels showing banded structure. The tensile ductility seems not to be enhanced by Zr addition. Relationship between the shape of sulphides and the compressive ductility is discussed.

(Received Mar. 2, 1971)

1. 緒 言

鋼の機械的性質の異方性は、その製造工程において一方向のみ大きな塑性加工（一般には熱間圧延）を与えることに起因するが、冶金的要因としては、組織、介在物および表面状況（たとえば疵など）と大きな関連がある。このうち介在物としては、いわゆるA系およびB系介在物が主役を演ずるが、とくにA系介在物は硫黄快削鋼として積極的に利用されており、この点に関しては、硫化物系介在物のコントロールは重要な意味をもっている。

鋼の被削性という観点からは、硫化物系介在物の形状が圧延方向に伸びない、したがって球状に近い方が好ましいとされているが¹⁾²⁾、このような効果を期待できる処理に Zr の微量添加がある。すなわち、一般に鋼に Zr を添加することにより、硫化物系介在物は丸みをおび^{3)~7)}圧延直角方向の靱性が回復してくる^{5)~7)}といわれている。

このような介在物形状に起因する靱延性の異方性は、鋼材の冷間加工性とも密接に関連することが予想される。さらに組織の異方性による冷間加工性への影響も当然重畳してくるはずである。そこで本研究では、異方性の異なる組織をもった低炭素鋼において、それぞれ介在物形状が冷間加工性にどの程度寄与するかを引張試験および圧縮試験によって種々検討した。

2. 試料および実験方法

2.1 試料

2.1.1 試料の作製法および化学組成

実験に使用した試料は、すべて実験用高周波誘導炉で 5 kg 鋼塊に大気中で溶製しており、0.2%C, 1.0%Mn の基本組成に 0.2% 以下の S と 0.2% 以下の Zr を含有せしめたものである。なお、Zr の添加は Si, Mn および Al で脱酸後、市販の Fe-Zr 合金 (Zr 含有量, 78%) によつて行なつた。引張および圧縮試験片は 5 kg 鋼塊を 25 mmφ に鍛伸し (鍛伸率, 8.5), 所定の熱処理後中心部より削り出すことによつて作製した。

Table 1 に試料の主要成分分析値を掲げる。ここで A 系列の試料は、均一球状化組織および縞状組織における冷間加工性を検討する目的で使用し、B 系列の試料は、不均一球状化組織の冷間加工性および介在物形状を検討する目的に使用した。

2.1.2 試料の熱処理および組織

異方性の異なる 3 種類の組織をうるため、鍛伸後それぞれつぎのような熱処理を行なつた。

* 昭和45年10月本会講演大会にて発表
昭和46年3月2日受付

** 愛知製鋼(株)

*** 愛知製鋼(株) 工博

Table 1. Chemical composition of specimens (wt%).

Steel	C	Si	Mn	P	S	Cr	Al	Zr	Zr/S
A 1	0.14	0.26	1.11	0.018	0.023	0.15	0.045	—	—
A 2	0.16	0.22	0.81	0.017	0.097	0.14	0.030	—	—
A 3	0.15	0.17	0.87	0.016	0.200	0.14	0.045	—	—
A 4	0.16	0.23	1.03	0.018	0.022	0.14	0.040	0.05	2.27
A 5	0.16	0.23	0.99	0.017	0.107	0.14	0.038	0.05	0.47
A 6	0.16	0.26	1.13	0.012	0.014	0.14	0.039	0.17	1.21
A 7	0.16	0.19	0.89	0.016	0.205	0.14	0.029	0.20	0.97
B 1	0.17	0.28	0.90	0.017	0.042	0.10	0.032	—	—
B 2	0.18	0.22	1.01	0.011	0.090	0.09	0.036	—	—
B 3	0.18	0.23	0.98	0.014	0.123	0.09	0.030	—	—
B 4	0.15	0.22	0.94	0.015	0.041	0.10	0.030	0.06	1.46
B 5	0.17	0.23	0.92	0.014	0.079	0.09	0.026	0.07	0.89
B 6	0.16	0.24	0.91	0.013	0.113	0.11	0.026	0.06	0.53
B 7	0.22	0.24	0.94	0.014	0.023	0.13	0.022	0.19	7.82
B 8	0.22	0.27	0.86	0.013	0.085	0.13	0.022	0.18	2.00
B 9	0.20	0.22	0.90	0.013	0.133	0.12	0.020	0.17	1.28

(1) 完全球状化組織

925°C, 1hr 加熱後, 水塩水中に焼入し, 650°C, 125 hr 焼戻後空冷した.

(2) 縞状組織

925°C, 1hr 加熱後, 500°C まで 30°C/hr の速度で冷却後空冷した.

(3) 不均一球状化組織

925°C, 1hr 加熱後空冷し, ついで 750°C, 10hr 加熱し, 600°C まで 10°C/hr の速度で徐冷した.

これら 3 種の熱処理を施した状態の組織の一例を Photo. 1 にそれぞれ示したが, 完全球状化組織についてはほぼ均一に球状化炭化物が分散しているが, 縞状組織については層状パーライトとフェライトが明りような band 状組織になつている. また不均一球状化組織については層状パーライトを含んだ不完全な球状化炭化物が焼準時に縞状パーライトの存在する位置に分散しているのが認められ, 完全球状化組織と縞状組織の中間的組織といえよう.

2.2 実験方法

2.2.1 冷間加工性の測定

各試料の冷間加工性を比較するため, 引張試験と圧縮試験を行ない, それぞれ変形抵抗および変形能を測定した. 引張および圧縮試験はアムスラー型 100 t 万能試験機で行なつたが, 引張試験には JIS 4号試験片を用い, 静的 (ラムスピード, 2.5 mm/min) に負荷を与えて除荷後に最小断面積を測定し, みかけの真応力 (荷重を最小断面積 A で割った値) と対数歪 ($\ln A_0/A$, A_0 : 初めの断面積) との関係図を求め, これより対数歪 0.2 に相当する流動応力で引張変形抵抗を示した. 一方圧縮試験には 10 mm ϕ \times 15 mm の円柱試験片を用い, 平行ダイ

ス法で無潤滑条件にて行なつた. (圧縮速度はラムスピードで 3 mm/min). このとき変形抵抗としては, 対数歪 $\ln H_0/H$ (H_0 : 初めの試験片の高さ, H : 除荷後の試験片の高さ) が 1.0 に相当する荷重を平均断面積で除した値をとつた. 引張試験の場合は局部収縮, 圧縮試験の場合は横ふくれができるため, 真の変形応力を求めることは不可能に近いが, このような簡便法でも各鋼種間の相対的な比較ならば可能である. なお, 引張対数歪 0.2 と圧縮対数歪 1.0 はいずれもみかけの真応力-対数歪曲線において, 直線部分にふくまれている.

変形能は引張試験の場合, 絞りおよび伸び, 圧縮試験の場合, 初めて割れを検出したときの高さ減少率 ($\ln H_0/H_f$, H_f : 初めて割れを検出したときの高さ. 以下, 限界圧縮率と呼ぶ) で比較した. 引張および圧縮試験の結果はすべて 2, 3 個の測定値の平均で示した.

2.2.2 非金属介在物の測定

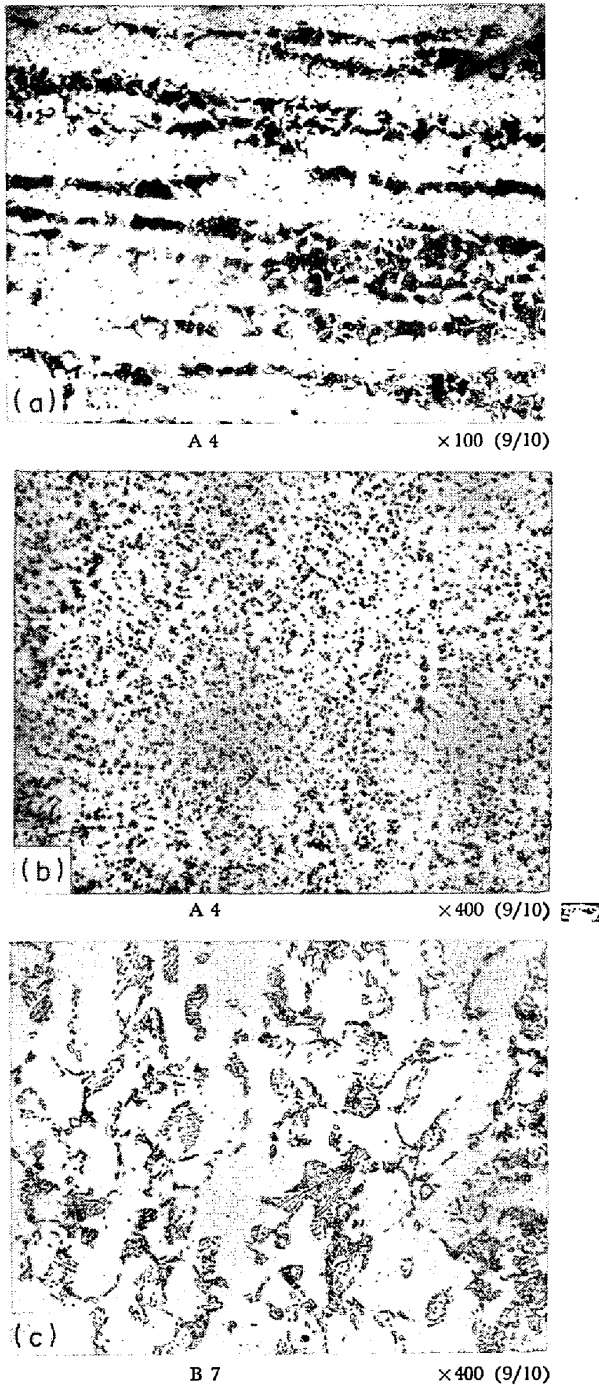
各試料の非金属介在物量は JIS 法⁶⁾によつて面積率を測定した. さらにそれらの試料について, JIS 4号引張試験片の平行部に相当する領域, すなわち試料の中心線より半径にして 7 mm 以内の領域において, ランダムに 15 視野を選び 400 倍の光学顕微鏡写真を撮影した. これらの写真より長さが 1 μ 以上の介在物について個々の寸法 (鍛伸方向の長さ L および鍛伸直角方向の幅 W) をノギスにより測定した.

また硫化物系介在物中の Zr 量については, EPMA によつて測定を行なつた.

3. 実験結果および考察

3.1 完全球状化組織における冷間加工性

まず, A 系列試料を用いて完全球状化組織における冷



(a) Annealed, banded structure
 (b) Quenched and tempered, uniform spheroidized structure
 (c) Spheroidized, nonuniform spheroidized structure

Photo. 1. Microstructure of specimens.

間加工性について検討した。Fig. 1 に引張試験の結果、すなわち引張特性と S 含有量との関係を Zr 量の異なる試料について示す。図にみるごとく、鋼中の S 含有量が増加するにしたがって、下降伏点、変形抵抗のごとき強度は低下し、絞りのごとき延性もまた減少する傾向があるが、伸びについては多少ばらつきが認められ、はっきりした傾向を示さない。また、Zr 含有量の変化につい

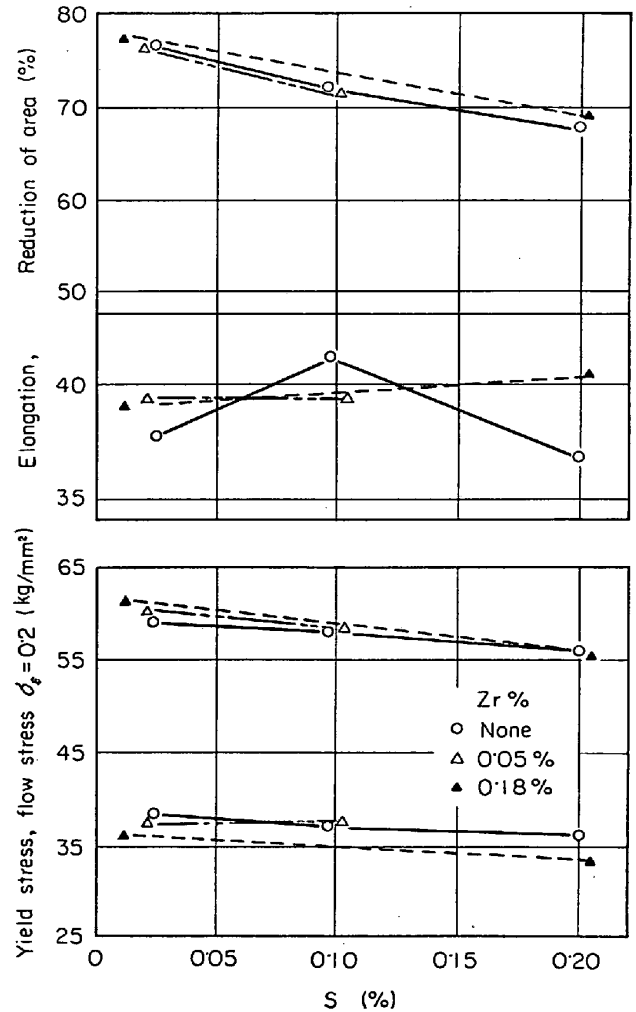


Fig. 1. Effect of sulphur % and Zr addition on the tensile properties in uniform spheroidized structure.

ては上記の強度および延性に関するいずれの性質に対してもその影響を認めることはできない。

Fig. 2 には、圧縮試験の結果を示した。変形抵抗に対する S および Zr 含有量の効果は、Fig. 1 における引張試験の場合のそれと同様な傾向を示すが、限界圧縮率について Zr の効果を見ると、限界圧縮率は Zr 含有量によつて大きな影響を受けることが知られる。すなわち、同一 S 含有量で比較した場合、Zr 含有量が多いほど限界圧縮率は大きくなる。この圧縮試験の結果は上述の引張試験の結果とまったく対照的であり、非常に興味深いものである。

3.2 縞状組織における冷間加工性

つづいて A 系列試料を用いて縞状組織における冷間加工性について検討した。引張試験の結果を Fig. 3 に示す。この結果を完全球状化組織における場合の結果 (Fig. 1) と比較してみると、縞状組織における引張特性は完全球状化組織におけるそれと類似しており、鋼中の S 含

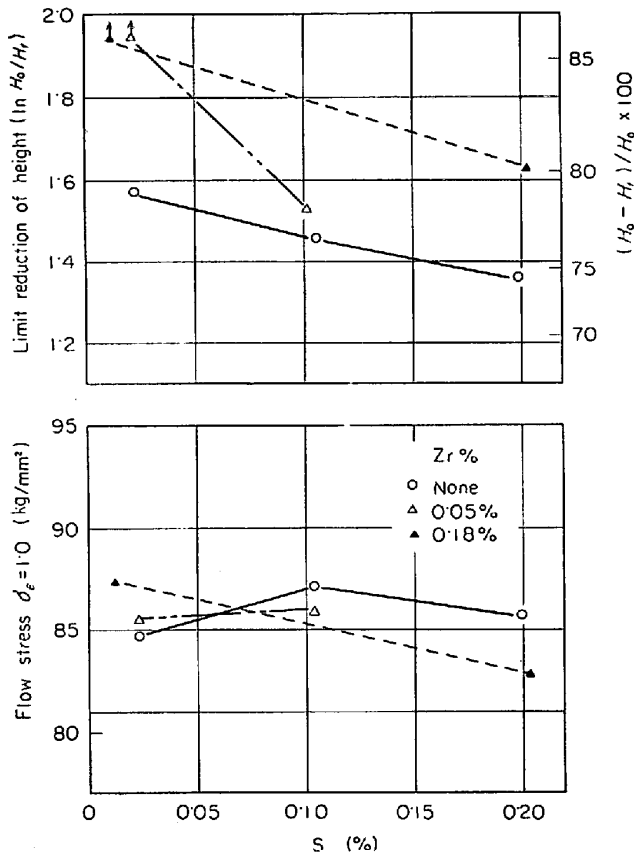


Fig. 2. Effect of sulphur % and Zr addition on the compression properties of the same steels as in Fig. 1.

有量が増加するにしたがって下降伏点および変形抵抗は低下、絞りもまた減少し、伸びははつきりした傾向を示さない。しかしながら、引張特性の絶対値については、縞状組織の場合の方は完全球状化組織の場合よりも下降伏点および変形抵抗が 5 kg/mm^2 程度低く、それにもかかわらず、絞りもまた全体的に約 10% 低いことが認められる。

一方、Zr 処理の効果については、Fig. 1 に示した結果と同様、強度および延性におよぼす Zr 含有量の影響はまったく認められない。

圧縮試験の結果は Fig. 4 に示したが、完全球状化組織における場合の結果 (Fig. 2) と大きな差異がある。すなわち、0.01~0.20% に変化した S 含有量の 3 つの水準のいずれにおいても、限界圧縮率は Zr 含有量に無関係に大体一定で、縞状組織における場合の限界圧縮率は Zr 含有量によってほとんど影響を受けないであろうと考えられる。

3.3 不均一球状化組織における冷間加工性

さらに B 系列試料を用いて不均一球状化組織における冷間加工性について検討した。Fig. 5 は引張試験の結果

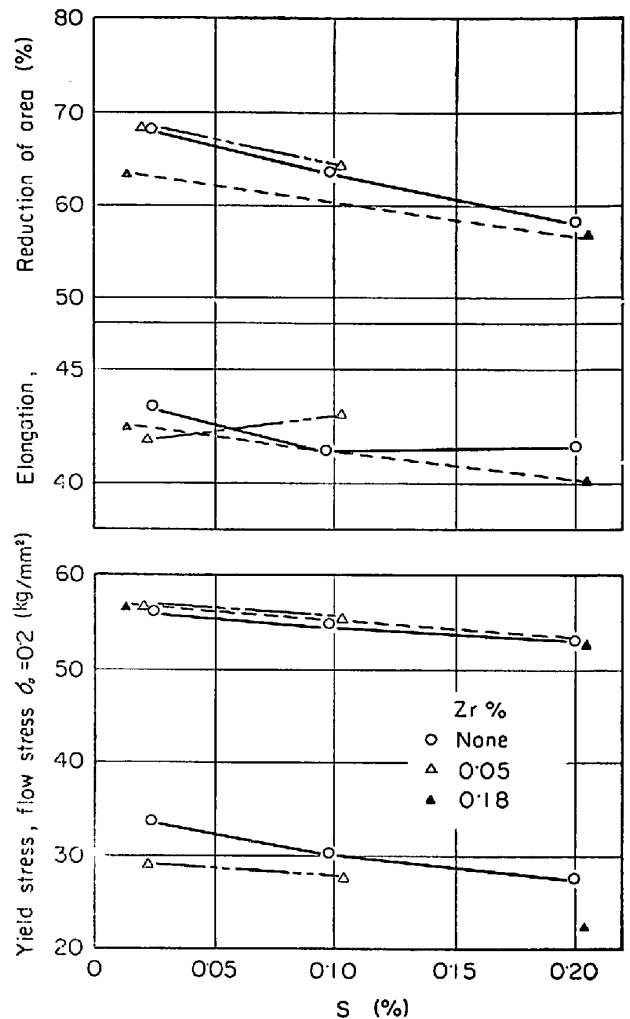


Fig. 3. Effect of sulphur % and Zr addition on the tensile properties in banded structure.

を示す。B 系列試料の S 含有量は 0.02~0.13% の範囲に変化しているため、S 含有量が 0.01~0.20% の範囲に変化した A 系列試料を使用した完全球状化組織および縞状組織における試験結果の場合と比較して、引張特性におよぼす S 含有量の影響はやや不明りようとなるが、不均一球状化組織における場合も完全球状化組織および縞状組織における場合と大体同様な傾向を示している。

また Zr 処理をした場合、しない場合と比較して下降伏点、変形抵抗のごとき強度が低目であり、かつ絞りも同程度あるいはむしろ低く、引張延性が Zr 処理によってまったく改善されないことは明らかである。この傾向に関しては、前述の完全球状化組織および縞状組織における場合と類似している。

Fig. 6 には圧縮試験の結果を示した。Zr 含有量の異なる試料においての変形抵抗と S 含有量との関係について観察すると、Zr 処理を行わない試料の変形抵抗が Zr 処理を行なった試料のそれよりやや高いことが知ら

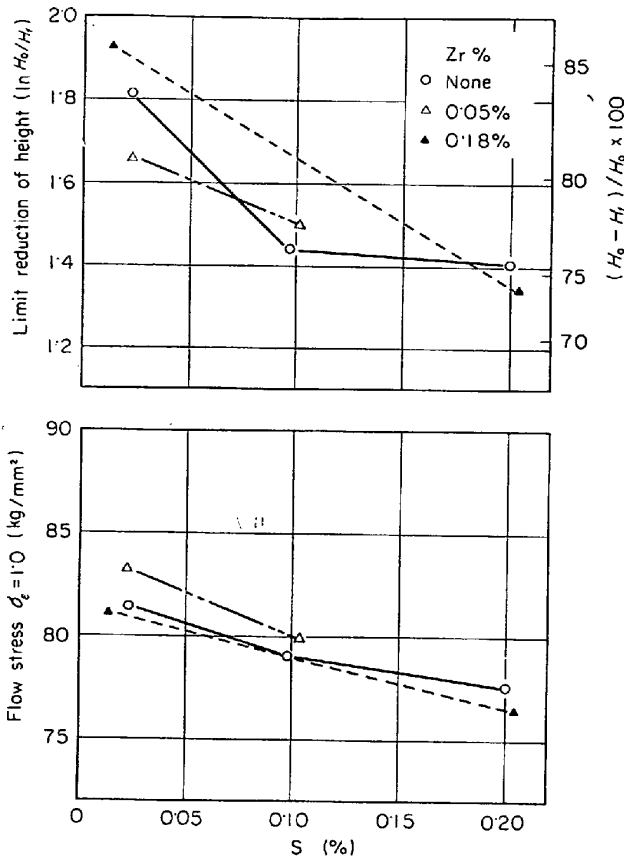


Fig. 4. Effect of sulphur % and Zr addition on the compressive properties of the same steels as in Fig. 3.

れる。しかしながらそれを考慮してもなお限界圧縮率は Zr 処理によって、いちじるしく改善されることは明らかである。すなわち、鋼中の S 含有量が増加するにしたがって限界圧縮率は低下するが、同一 S 含有量で比較した場合 Zr 含有量が多いほど限界圧縮率は大きな値を示す。しかも、Zr 処理の効果は S 含有量の低いほど大きくあらわれる。したがって、Zr%/S% の比の値の大なるほど限界圧縮率は大きくなるということになる。不均一球状化組織におけるこのような傾向は、完全球状化組織における場合のそれ (Fig. 2) と大体一致しており、縞状組織の場合のそれ (Fig. 4) とは異なっている。

3.4 非金属介在物

3.4.1 S 含有量と介在物量との関係

本研究では、冷間加工性の検討に加えて非金属介在物の量および形状について種々検討を行なった。B 系列試料を用いて S 含有量と JIS 法によつて測定された介在物の面積率との関係を Fig. 7 に示した。従来の研究報告によつてすでによく知られているごとく⁹⁾、A 系介在物量は鋼の S 含有量とともに増加する。Fig. 7 にみるごとく本実験の結果においても A 系介在物量は試料の S 含

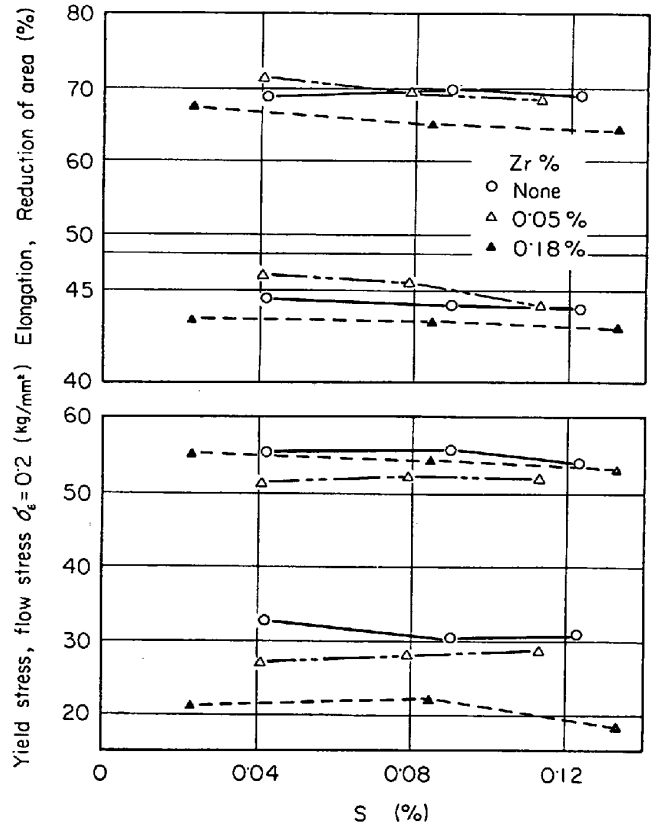


Fig. 5. Effect of sulphur % and Zr addition on the tensile properties in nonuniform spheroidized structure.

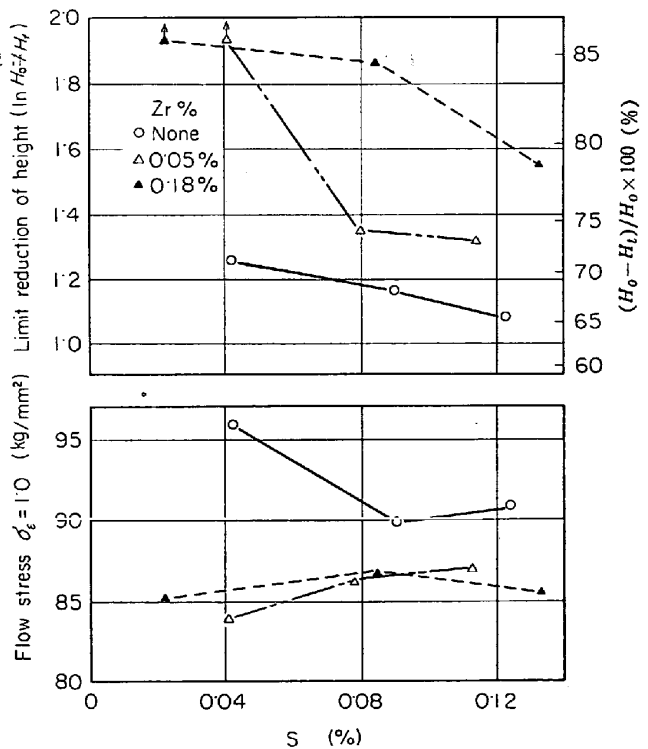


Fig. 6. Effect of sulphur % and Zr addition on the compressive properties of the same steels as in Fig. 5.

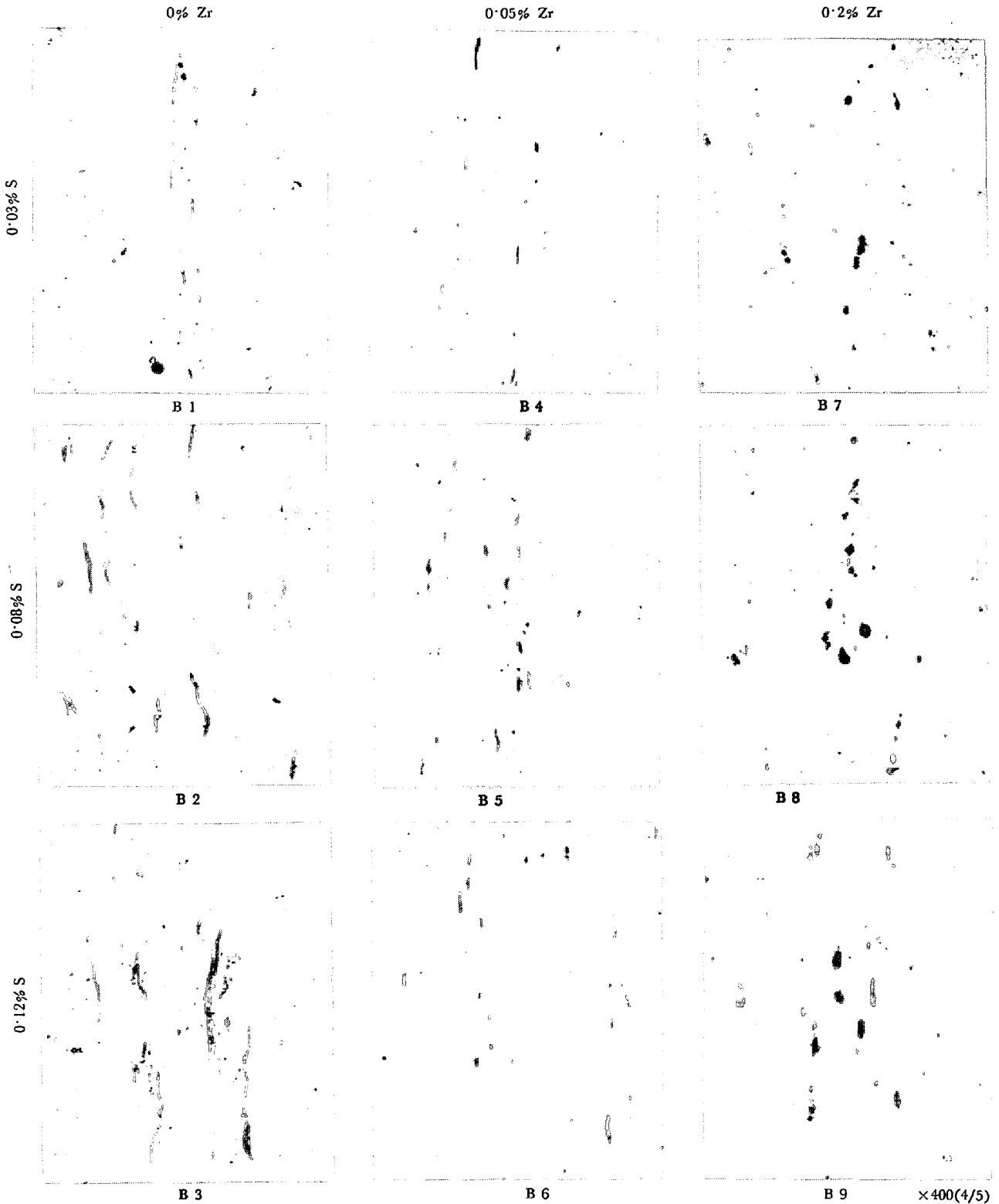


Photo. 2. Effect of Zr addition on the shape of sulphides. Forging ratio 8.5.

有量が増加するにしたがって直線的に増加している。同図にはまた、S含有量とB+C系介在物量との関係を示したが、Zrを0.18%含有している試料においては、C系介在物（図中にはB系とC系介在物量の和で示すがB系介在物量は無視しうる程度に小さい）が多く存在し

ており、A系介在物量がむしろ逆に比較的低位に存在する傾向が認められた。

3.4.2 Zr添加による介在物の形状の変化

Zr添加により鋼中の非金属介在物の形状がいかに変化するかを知るために、B系列試料について光学顕微鏡

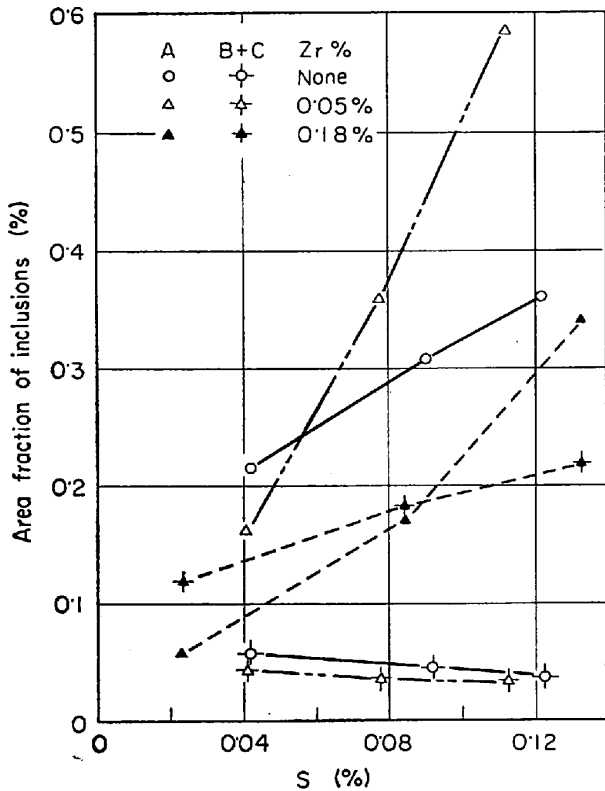


Fig. 7. Relation between area fraction of inclusions and sulphur % in various Zr treated steels. Inclusions are classified as A type and (B+C) type according to JIS.

的に観察を行なった。各試料の介在物の形状を光学顕微鏡写真によつて Photo. 2 に示す。写真より同一 S 含有量で比較した場合、Zr 含有量の多い方が、また同一 Zr 含有量で比較した場合、S 含有量の少ない方が介在物は鍛伸方向に伸びにくい傾向のあることが明りようである。すなわち、Zr%/S% の比の値が大なるほど介在物の変形度は小さい。

400 倍の光学顕微鏡写真において、明らかに硫化物系でないと思われる介在物は除外して、長さ 1 μ 以上のものについて、長さ (L) および幅 (W) を測定した。その結果を Fig. 8 に示す。Fig. 8 より Zr%/S% の比が大きくなるほど、長さ (L) の小さい介在物の個数が増加することおよび幅 (W) の大きい介在物の個数が増加することが知られる。

この関係を一層明確にするために、Fig. 9 に Zr%/S% に対して W/L の平均値を図示した。この図より明らかなごとく、鋼中の Zr%/S% の比によつて硫化物系介在物の形状は急激に球状に近づいていくことが認められる。

3.4.4 硫化物系介在物中の Zr 含有量

Zr 処理鋼においては、Zr が硫化物中に Mn, Fe を

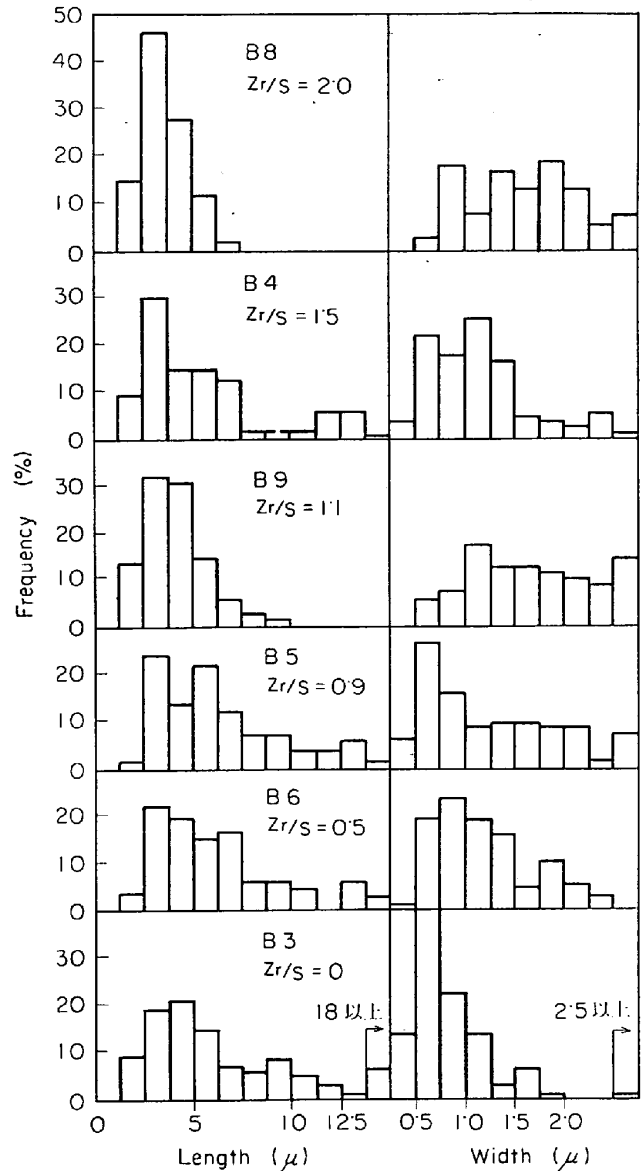


Fig. 8. Effect of Zr%/S% on the size distribution of the sulphide inclusion.

置換した形で含まれ、このため展延性を減ずるものといわれているが、本研究においてもこれを確認するため、介在物の EPMA 分析を行なった。Fig. 8 にみるごとく、EPMA 分析にとつて十分な大きさの介在物がきわめて少ないため、正確な元素の定量がなされないという懸念はあるが、比較的大きな介在物の中心にビームをあて、S の X 線強度比が 12% を超えたものについて、Zr および S 量を測定した。この結果より、えられた介在物中の Zr と S の重量%の比を縦軸にとり、化学分析による鋼中の Zr と S の分析値の比を横軸にとつて図示したのが Fig. 10 である。図中にプロットされた値はかなり大きくばらついてはいるが、鋼中の Zr%/S% の比が大きくなるにつれて介在物中の S 量に対する Zr 量もまた増加していくことは明らかである。

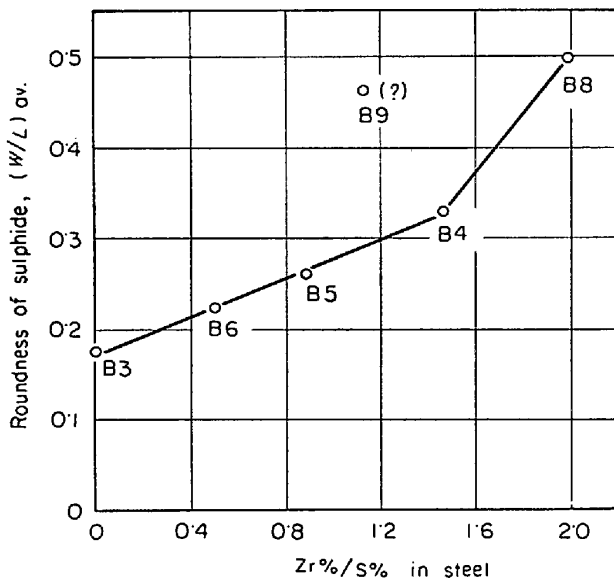


Fig. 9. Relation between roundness of sulphide and Zr%/S% in steel. Roundness index 1 means complete sphere.

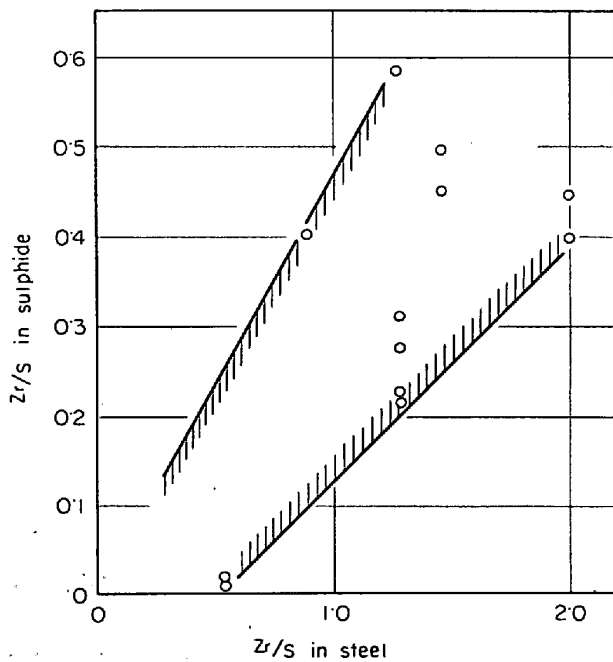


Fig. 10. Relation between Zr%/S% ratios in sulphide and in steel.

3.5 考 察

以上、Zr および S 含有量を変化させた試料を用いて、完全球状化組織、縞状組織および不完全球状化組織における冷間加工性について、さらに非金属介在物の量および形状について種々検討を行なった。その結果、完全球状化組織および不完全球状化組織の冷間加工性と S 含有量との関係は Zr 含有量によつて大きな影響をうける、すなわち圧縮試験における限界圧縮率は Zr 含有量の増

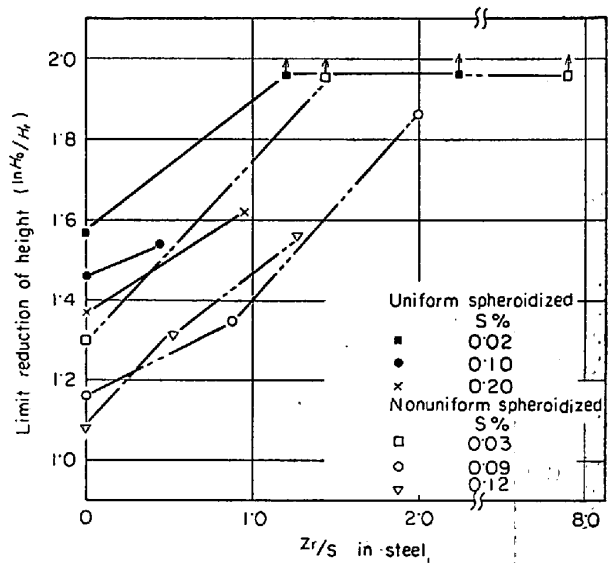


Fig. 11. Relation between compressive ductility and Zr%/S% in spheroidized steels.

加によつていちじるしく改善されるが、一方縞状組織における場合は冷間加工性への Zr 含有量の影響は小さいことが認められた。

鋼材の延性の異方性は主として組織および介在物の面からその原因が考えられるが、焼入焼戻処理によつてえられた均一完全球状化組織の場合、あるいはわずかに縞状組織の痕跡を残した層状パーライトを含む不均一球状化組織のように比較的異方性の少ない組織の場合には、Zr 処理の効果はいちじるしく発揮されるであろうと思われる。この傾向を明示するために、Fig. 11 に鋼中の Zr と S の分析値の比に対する限界圧縮率の関係を図示した。この図は鋼中の S 含有量が同程度の場合、鋼中の Zr 含有量が増加するほど限界圧縮率が向上することをあらわしている。しかしながら、ここで Zr 処理は引張延性（絞り）の向上にはまったく寄与しないことに注意しなければならない。換言すれば、熱間加工方向に伸ばした介在物は引張延性にはまったく影響をあたえないが、圧縮延性には大きな影響をあたえ、この性質をいちじるしく低下させるということである。この原因は Zr が少量添加されることによつて、硫化物系介在物の展延性を減少させることになり、その結果圧縮延性が回復してくることによると思われる。

縞状組織における場合には、この Zr の効果が小さいが、これはもともと組織による延性の異方性がきわめて大きいため、Zr 処理による介在物形状改善の効果が、これによつて隠蔽されてしまうものであるからである。

さて、構造用鋼の冷間加工性の指標として、一般に絞

り値でもつてあらわすことが行なわれているが、上述の事実より、絞り値の比較は鋼の組織および介在物の形状によつて延性の異方性が異なるため正確とはいえず、鋼の冷間加工性を検討するためには、引張および圧縮試験の結果を併用して考察することが必要であると結論される。

4. 結 言

完全球状化組織、不均一球状化組織および縞状組織を有する低炭素鋼の冷間加工性におよぼす Zr 処理の効果を介在物形状との関連から検討した結果、以下のごとく要約される。

(1) 硫化物系介在物の形状は鋼中の Zr(%) / S(%) の比が大なるほど、介在物中の Zr 含有量は高くなり、その形状は球状に近づく。

(2) 鋼中の S 含有量が同程度の場合、Zr 含有量が大なるほど圧縮延性は良好である。ただし、この効果は鋼の組織によつて異なり、球状化組織の場合に有効で、フェライトおよびパーライトからなる縞状組織の場合にはほとんど効果は認められない。

(3) いずれの組織の場合にも、引張延性の改善には Zr 添加の効果は認められない。

おわりにのぞみ、非金属介在物の EPMA 分析によつて本研究に種々ご援助をいただいた、(株)豊田中央研究所諸氏に感謝の意を表する。

文 献

- 1) V. VLACK: Trans. ASM, 45(1953), p. 741
- 2) E. J. PALIWADA: Trans. ASM, 47(1955), p. 680
- 3) V. S. KOVALENKO, V. N. MURAV'EV, and L. F. FILINA: Stal in Eng., (1964), p. 136
- 4) E. J. LICHY, G. C. DUDERSTADT, and L. N. SAMWAYS: J. Metals, 17(1965), p. 769
- 5) 加藤: 鉄と鋼, 48(1962), p. 753
- 6) J. H. BUCHER, G. C. DUDERSTADT, and K. PIENE: JISI, 207(1969), p. 225
- 7) F. HEISTERKAMP, D. LAUTERBORN, L. MEYER and C. STRASSBURGER: Stahl u. Eisen, 90(1970), p. 1255
- 8) JIS G 0555 (1956)
- 9) たとえば, W. T. COOK: Iron Steel, 43 (1970), p. 363