

## 論文

## 中・高炭素鋼の機械的性質に及ぼす炭化物性状の影響

鈴木 雅人\* 大久保 直人\*\* 平松 昭史\*\*\*

Effect of Cementite Morphology on Mechanical Properties  
of Medium- and High-Carbon Steels

Masahito Suzuki, Naoto Ookubo, Akifumi Hiramatsu

## Synopsis:

Recently, high workability has been required in medium- and high-carbon steels. In terms of workability, the improvement of limiting deformability has come to be important. The workability of medium- and high-carbon steels is influenced significantly by the morphology of cementite.

The effect of cementite morphology on mechanical properties including limiting deformability was investigated in 0.36~0.76% C-steels.

It was quantitatively confirmed that ductility is improved by homogeneous dispersion and spheroidizing of cementite in addition to increasing the cementite diameter. Moreover notched elongation, that is, limiting deformability, is affected more by the dispersion and shape of cementite than is total elongation

## 1. 緒言

中・高炭素鋼は各種機械部品として多用されており、一般的には、成形加工された後、焼入焼戻し、浸炭等の熱処理が施されて製品化されている。最近では、成形方法の複雑化に伴い、従来よりも優れた変形能が求められるようになってきている。特に、伸びフランジ成形といった局所的に変形が集中する成形方法が採用される例が増加している。

中・高炭素鋼の加工性向上に関しては、金属組織の適正化が重要な課題である。加工性に影響を及ぼす因子としては、フェライト性状、介在物の形態および炭化物性状等が挙げられる。フェライト性状については、中・高炭素鋼においても、低炭素鋼と同様にSi等の固溶強化により加工性が低下することが知られている<sup>1)</sup>。また、中・高炭素鋼の加工性に最も影響すると考えられる炭化物性状に関して、種々の検討が実施され<sup>1)~3)</sup>、炭化物の球状化と粗大化により軟質化が図れることが報告されている。

一方、伸びフランジ成形性に関しては、高張力熱延鋼板

において、硬さや強度では整理できず、組織の最適化が重要であることが報告<sup>4),5)</sup>されている。しかしながら、中・高炭素鋼に関して、伸びフランジ成形性に及ぼす炭化物性状の影響について、体系的に検討された例は少ない。

そこで、C量が0.36~0.76mass%と異なる4鋼種を用いて、伸びフランジ成形性の評価の指標となる極限変形能<sup>6),7)</sup>を含めた機械的性質に及ぼす炭化物の粒径、数、分散状態および形状などの炭化物性状の影響について定量的に検討した。その結果を以下に報告する。

## 2. 実験方法

## 2.1 供試材

供試材の化学成分をTable 1に示す。炭化物量の影響を調査するため、C量の異なる0.36%C鋼、0.45%C鋼、0.56%C鋼および0.76%C鋼の4鋼種を用いた。なお、Si、Mn、PおよびS量は、いずれもほぼ同じレベルの鋼である。これらの鋼に種々の熱処理と冷間圧延を施して、炭化物の粒径、分散状態および形状を変化させた。

\*技術研究所 鋼材研究部鋼材第二研究チーム \*\*技術研究所 鋼材研究部鋼材第二研究チーム 主任研究員

\*\*\*技術研究所 鋼材研究部鋼材第二研究チーム チームリーダー

Table 1 Chemical composition of steels.(mass%)

Steel	C	Si	Mn	P	S
0.36%C-steel	0.36	0.19	0.85	0.012	0.008
0.45%C-steel	0.45	0.22	0.72	0.012	0.010
0.56%C-steel	0.56	0.21	0.73	0.011	0.008
0.76%C-steel	0.76	0.22	0.81	0.011	0.009

球状炭化物が均一に分散した状態で、球状炭化物の粒径を変化させるため、900℃×10minの溶体化後に、油中に焼入れ、続いて600～700℃×10～60hの焼鈍、30または40%の冷延後、600～700℃×10～100hの焼鈍を施した。また、一部の供試材には、炭化物をさらに大きくするため、上記の冷延、焼鈍の後、720～740℃×4h加熱後、徐冷する焼鈍を施した。

さらに0.45%C鋼については、炭化物の分散状態や形状も変化させた。900℃×10minの溶体化後に、550～680℃×15minの保持を施して初析フェライト量を変化させたフェライト+パーライト（以下、熱処理パーライト）組織を作製した。この熱処理パーライト組織を初

組織として、750～770℃×5h加熱後、徐冷する焼鈍を施し、棒状炭化物や焼鈍により生成するパーライト（以下、焼鈍パーライト）組織を作製した。また、熱処理パーライト組織を初組織として、前述の処理と同様に600～700℃×10hの焼鈍、30または40%の冷延、さらに600～700℃×10hの焼鈍を施すことにより、球状炭化物の分散状態を変化させた。

## 2.2 組織および機械的性質の定量化方法

炭化物組織の定量化方法をFig. 1に示す。炭化物組織の評価は金属組織のSEM写真を用いた画像解析により行った。画像解析には㈱ニレコ製LUZEXIIIUを使用した。

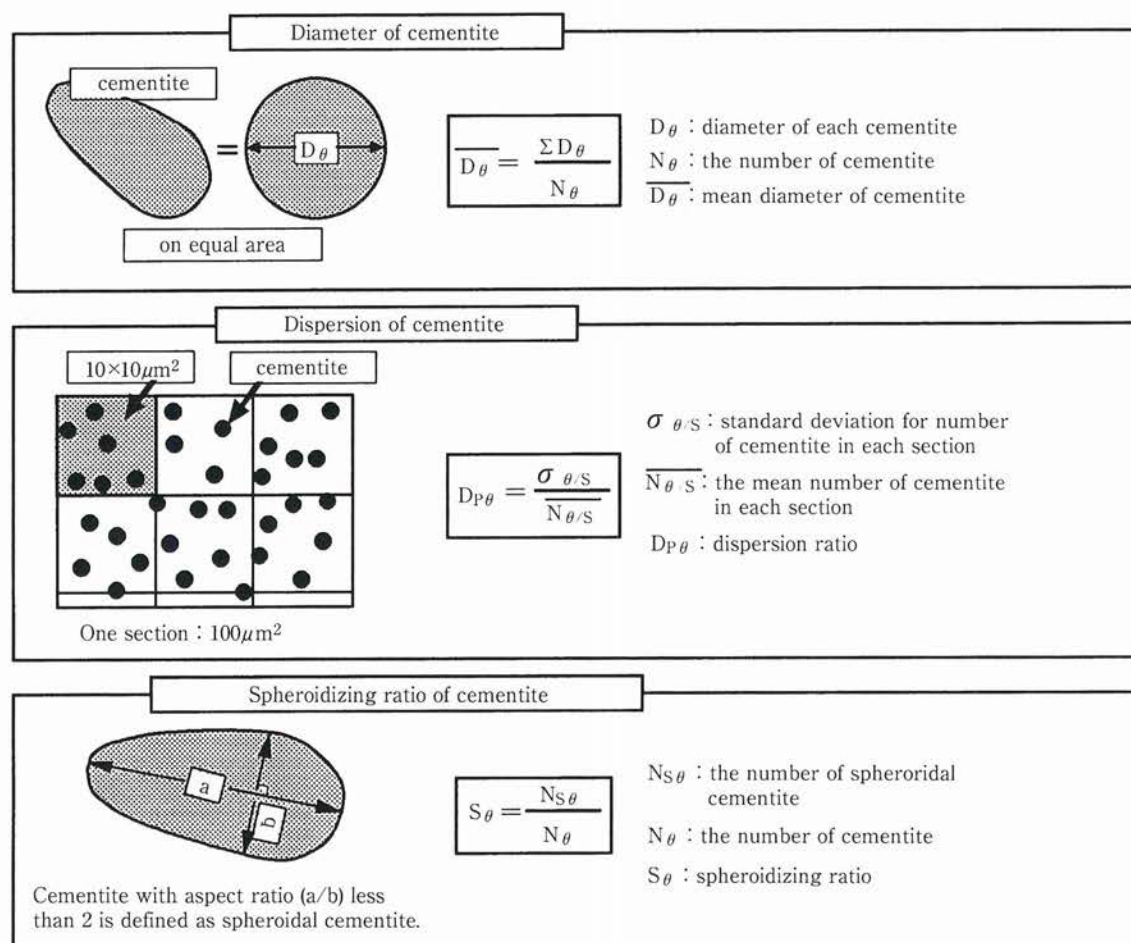


Fig. 1 Estimation of microstructures.



炭化物粒径の定量化にあたっては、炭化物の大きさに応じて、写真の撮影倍率を変化（2000～12000倍）させ、300個以上の炭化物について測定した。個々の炭化物の粒径は、その炭化物と等価な面積を有する円の直径とした。この炭化物粒径の平均値を平均炭化物粒径（ $\overline{D_\theta}$ ）として評価した。

炭化物の分散については、1000倍のSEM写真において、1区画を100 $\mu\text{m}^2$ として、各区画中に存在する炭化物数を350区画測定した。測定した炭化物数の標準偏差を1区画当たりの平均炭化物数で割った値を分散度（ $D_{90}$ ）として評価した。この $D_{90}$ は、小さいほど各区画の炭化物数のばらつきが小さく、炭化物の分散が均一であることを意味する。

炭化物の形状については、炭化物粒径の測定と同一視野において、個々の炭化物について長径と短径の比であるアスペクト比を測定した。アスペクト比が2以下の炭化物を球状炭化物と定義し、その球状炭化物数が全炭化物数に占める割合を球状化率（ $S_\theta$ ）とした。

機械的性質の評価として、JIS5号引張試験片を用いた引張試験を実施した。また、JIS5号引張試験片の平行部中央の両側に、深さ2mmのVノッチの切欠溝を付与した試験片を用いた引張試験（以下、切欠引張試験）を実施した。Vノッチ部を挟む標点間距離10mmにおける伸び率を切欠伸びとし、極限変形能の評価に用いた。なお、試験片の板厚は全て2mmとした。

### 3. 実験結果

#### 3.1 炭化物粒径と引張特性、切欠伸びの関係

球状炭化物が均一に分散したサンプルの組織例をFig. 2に示す。同一鋼種においては、炭化物粒径が小さいほど炭化物数が多い。また、同程度の炭化物粒径において、C量の異なる鋼種を比較すると、C量の多い鋼種の方が炭化物数が多い。

球状炭化物が均一に分散したサンプルの炭化物粒径と引張強さの関係をFig. 3に示す。いずれの鋼種においても、引張強さは炭化物粒径により比較的良好に整理でき、

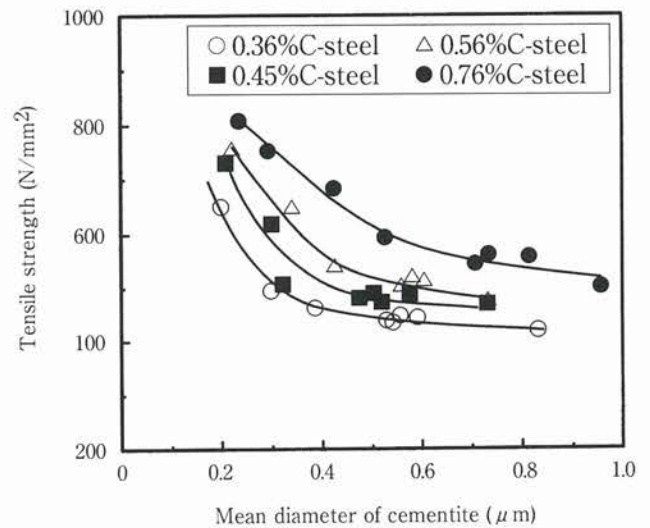


Fig. 3 Relationship between mean diameter of spheroidal cementite and tensile strength.

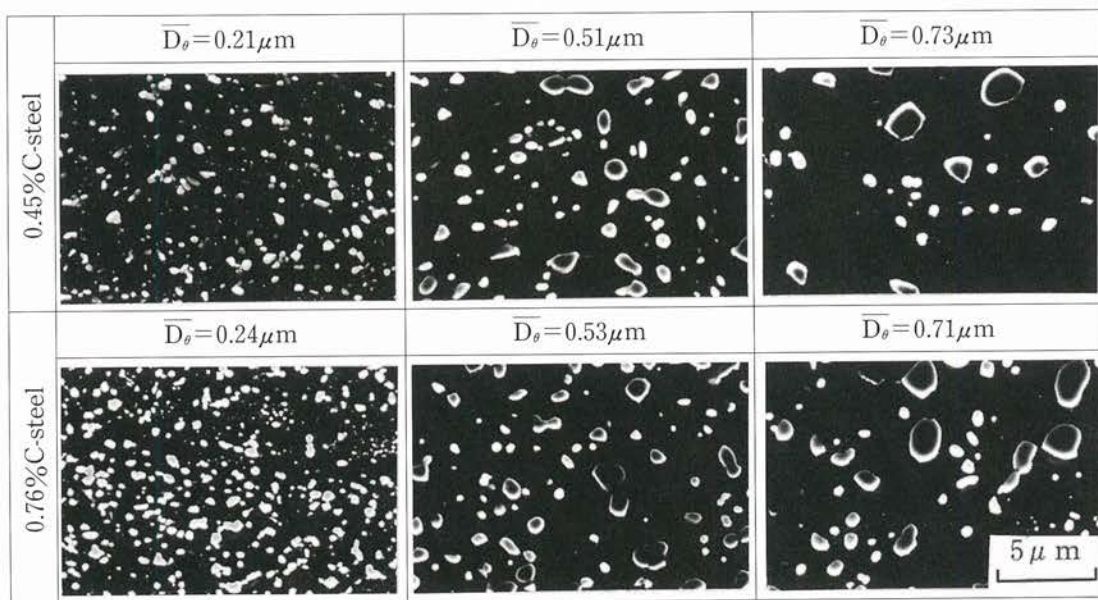


Fig. 2 Example of microstructures of homogeneous dispersed spheroidal cementite in 0.45%C-steel and 0.76%C-steel.

炭化物粒径の増加に伴い低下する。これは、炭化物粒径が大きくなると、炭化物数が減少し、主に炭化物の分散による強化<sup>8)</sup>が低下するためと考えられる。

炭化物粒径と全伸びおよび切欠伸びの関係をFig. 4に示す。いずれの鋼種においても、全伸び、切欠伸びともに炭化物粒径の増加に伴い増加するが、炭化物粒径が $0.5 \sim 0.6 \mu\text{m}$ 以上ではその変化は緩やかになる。

一般に、母相に比べて硬い析出物が分散した材料における延性破壊は、変形に伴い析出物を起点として生成し

たボイドが成長、連結して破壊が進行する<sup>9), 10)</sup>。炭素鋼においては、炭化物が小さいほど、すなわち、炭化物間距離が小さいほど、小さな変形量で炭化物を起点としたボイドが生成することが報告されている<sup>11)</sup>。本検討において、同一C量では炭化物粒径が大きいほど炭化物数が少なくなり、炭化物間距離が大きくなる。このため、炭化物粒径が大きいほど、炭化物を起点としたボイドが生成、連結しにくくなり、全伸びおよび切欠伸びが向上すると考えられる。

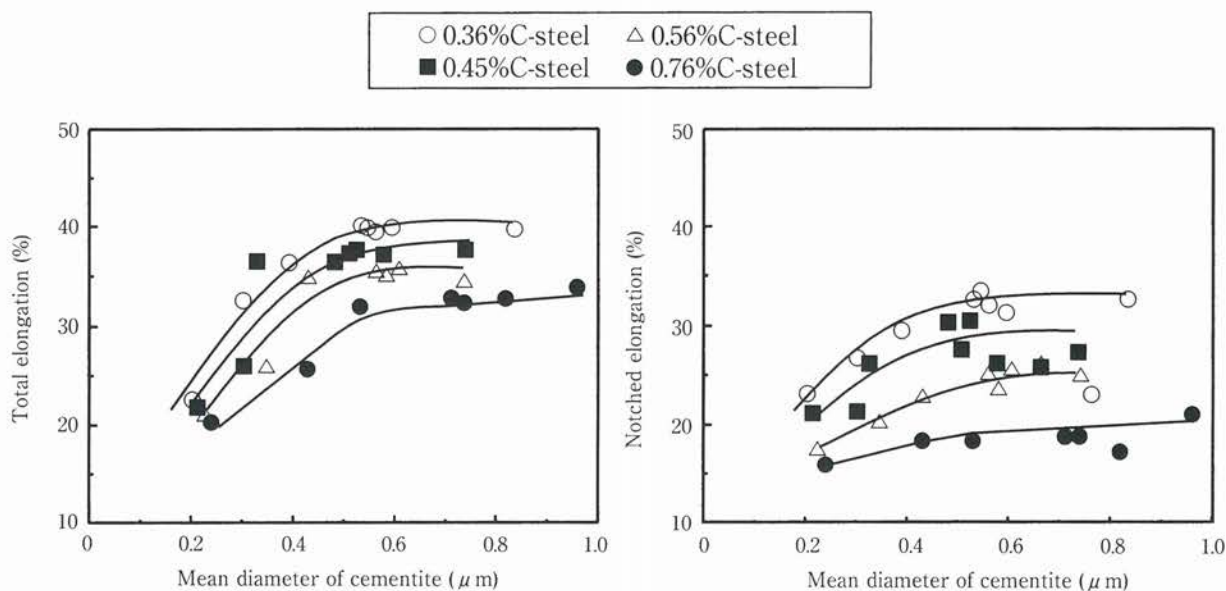


Fig. 4 Relationship between diameter of spheroidal cementite and elongations.

### 3.2 延性に及ぼす炭化物の分散状態の影響

0.45%C鋼において、球状炭化物の分散状態を変化させた組織例をFig. 5に示す。球状炭化物が均一分散した

組織 (S1) の分散度は20%であり、炭化物が均一に分散している。これに対し、球状炭化物が不均一分散した組織 (S2) では、焼鈍前の初組織において初析フェライトであった部分には炭化物が存在しないため、分散度

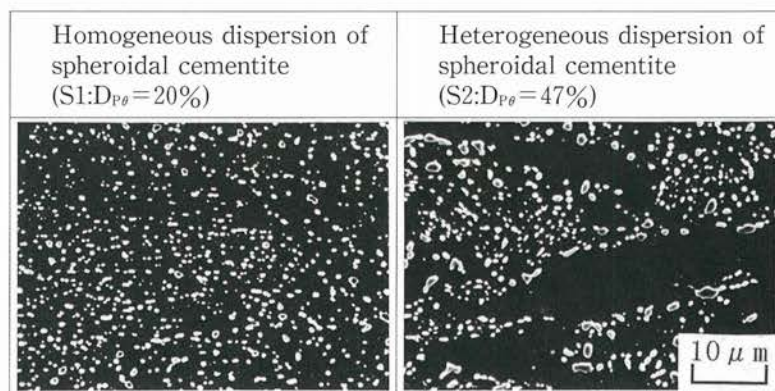


Fig. 5 Example of microstructures of different dispersion of spheroidal cementite in 0.45%C-steel.



は47%と炭化物が不均一に分散している。

このように球状炭化物の分散状態を変化させた0.45% C鋼の引張強さと全伸びおよび切欠伸びの関係をFig. 6に示す。引張強さの増加に伴い、全伸びは一様に低下する。この引張強さと全伸びとの関係には、炭化物の分散状態は

ほとんど影響を及ぼさない。切欠伸びについても、引張強さが増加すると、低下する傾向にあるが、球状炭化物が不均一分散した組織に比べて均一分散した組織の切欠伸びの方が高い水準にある。このように、切欠伸びに及ぼす炭化物の分散状態の影響は全伸びに及ぼす影響に比べて大きい。

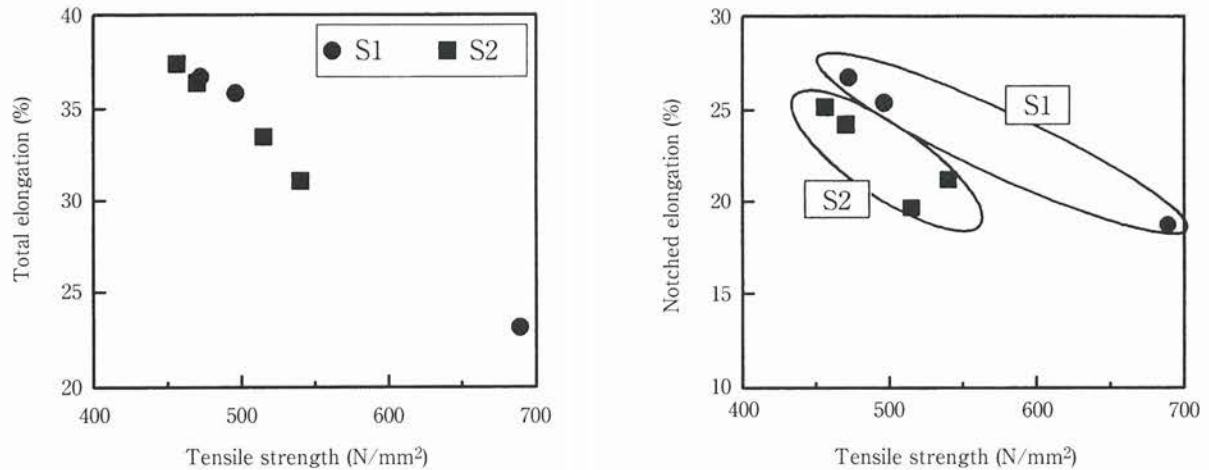


Fig. 6 Relationship between tensile strength and elongations in 0.45% C-steel of different dispersion of cementite.

S1:homogeneous dispersion, S2:heterogeneous dispersion

### 3.3 延性に及ぼす炭化物形状の影響

炭化物の形状を変化させた0.45% C鋼の組織例をFig. 7

に示す。球状炭化物組織 (S1) の球状化率は92%と高いが、棒状炭化物組織 (R) の球状化率は67%と低く、棒状の炭化物が多く認められる。また、熱処理パーライ

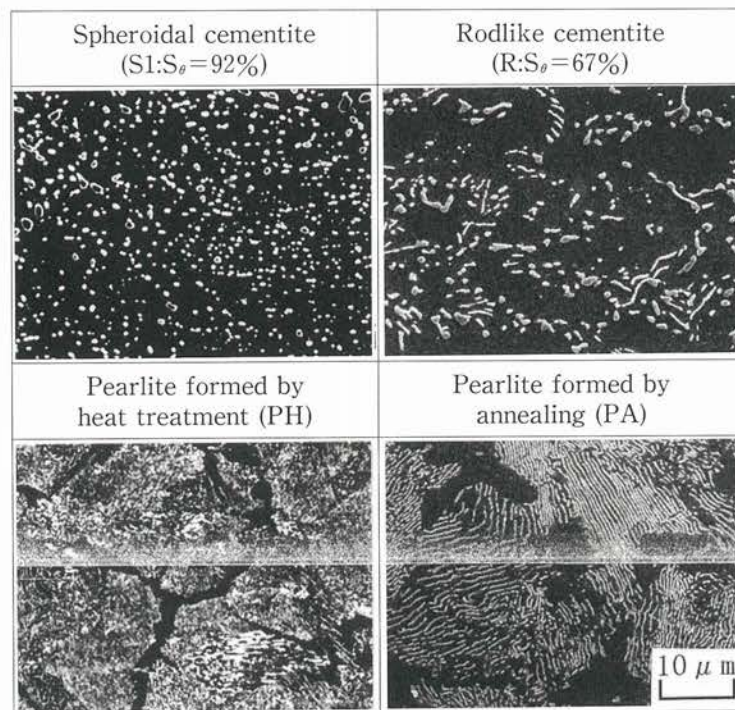


Fig. 7 Example of microstructures in various shape of cementite in 0.45% C-steel.

ト組織 (PH) および焼鈍パーライト組織 (PA) は、いずれもフェライト+パーライトの混合組織である。熱処理パーライト組織に比べて焼鈍パーライト組織のラメラ間隔は大きい。

以上のような炭化物の形状を変化させた0.45%C鋼の引張強さと全伸びおよび切欠伸びの関係をFig. 8に示す。引張強さの増加に伴い全伸びは一様に低下し、その変化は炭化物の形状にほとんど影響されない。これに対して、切欠伸びは炭化物の形状により大きく影響される。球状炭化物組織に比べて、棒状炭化物組織および熱処理パーライトの切欠伸びは若干低い値を示す。また、焼鈍パーライト組織においては、引張強さが550N/mm<sup>2</sup>程度であ

っても切欠伸びは約13%であり、同一強度レベルの球状炭化物組織 (切欠伸び約20%) よりも著しく低い。このように、炭化物の形状は、切欠伸びに大きく影響することが明らかになった。

#### 4. 考 察

前述したように、極限変形能を含めた機械的性質は、炭化物の粒径、分散状態および形状などの炭化物性状に影響される。特に、極限変形能の指標となる切欠伸びに及ぼす炭化物性状の影響は、全伸びの場合と異なる。そこで、炭化物の粒径、分散状態および形状を定量化し、

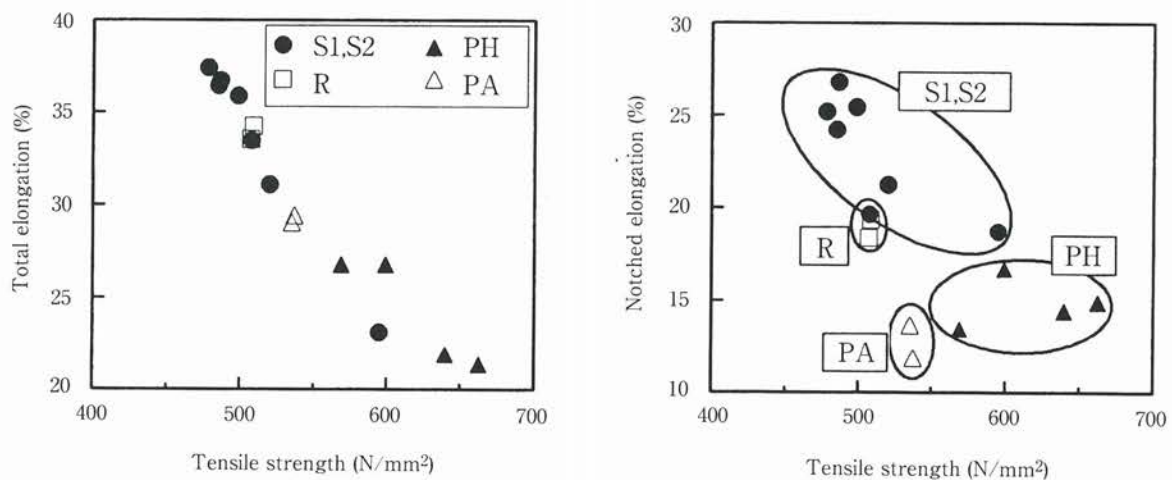


Fig. 8 Relationship between tensile strength and elongations in 0.45%C-steel of various shape of cementite.  
S1, S2:spheroidal cementite, R:rodlike cementite,  
PH:pearlite formed by heat treatment,  
PA:pearlite formed by annealing

主に切欠伸びと全伸びに及ぼすこれらの炭化物性状の影響を個別に検討した。

##### 4.1 引張強さ、全伸びおよび切欠伸びに及ぼすC量の影響

ここでは、機械的性質に及ぼすC量の影響について検討する。球状炭化物が均一に分散したサンプルの引張強さ、全伸びおよび切欠伸びに及ぼすC量の影響をFig. 9に示す。この図は、引張強さ、全伸びおよび切欠伸びを炭化物粒径で整理したFig. 3および4の結果から、各鋼種において、炭化物粒径が0.5 $\mu$ mのときの値を読み取りプロットした図である。Fig. 9においては、炭化物粒径が一定であるため、C量の増加は炭化物数の増加を意味する。

C量の増加に伴い、引張強さは単調に上昇する。これ

は、C量の多い鋼種ほど炭化物数が多くなることにより、主に球状炭化物の分散による強化<sup>8)</sup>が大きくなるためと考えられる。

全伸びおよび切欠伸びは、C量の増加に伴い単調に低下する。これはC量が多いほど炭化物数が多くなり、3.1節で述べたように小さな変形量においてボイドの生成、連結が進行するためと考えられる。また、C量が0.76 mass%から0.36 mass%に減少すると、全伸びは約1.3倍、切欠伸びは約1.7倍になる。このようにC量の減少に伴う伸び値の上昇は、全伸びに比べて切欠伸びの方が大きい。全伸びにおいては、ボイドの生成をほとんど伴わない均一伸びを含めた評価であり、炭化物数の影響が比較的小さくなったと思われる。これに対し、切欠引張試験では、変形が局所的に集中し、比較的早い段階においてボイドが生成するため、切欠伸びに及ぼす炭化物数



の影響がより顕著になると考えられる。

#### 4.2 延性に及ぼす炭化物の分散度の影響

全伸びおよび切欠伸びを炭化物の分散度で整理した。炭化物の分散状態が異なる組織を有する0.45%C鋼の全伸びおよび切欠伸びを引張強さで整理したFig. 6においては、炭化物粒径が $0.38\sim 0.67\mu\text{m}$ と異なっている。そこで、Fig. 4の全伸びおよび切欠伸びと炭化物粒径の関係を基に、炭化物粒径を $0.5\mu\text{m}$ に補正した。例えば、Fig. 6において、引張強さが $496\text{N/mm}^2$ で全伸びが

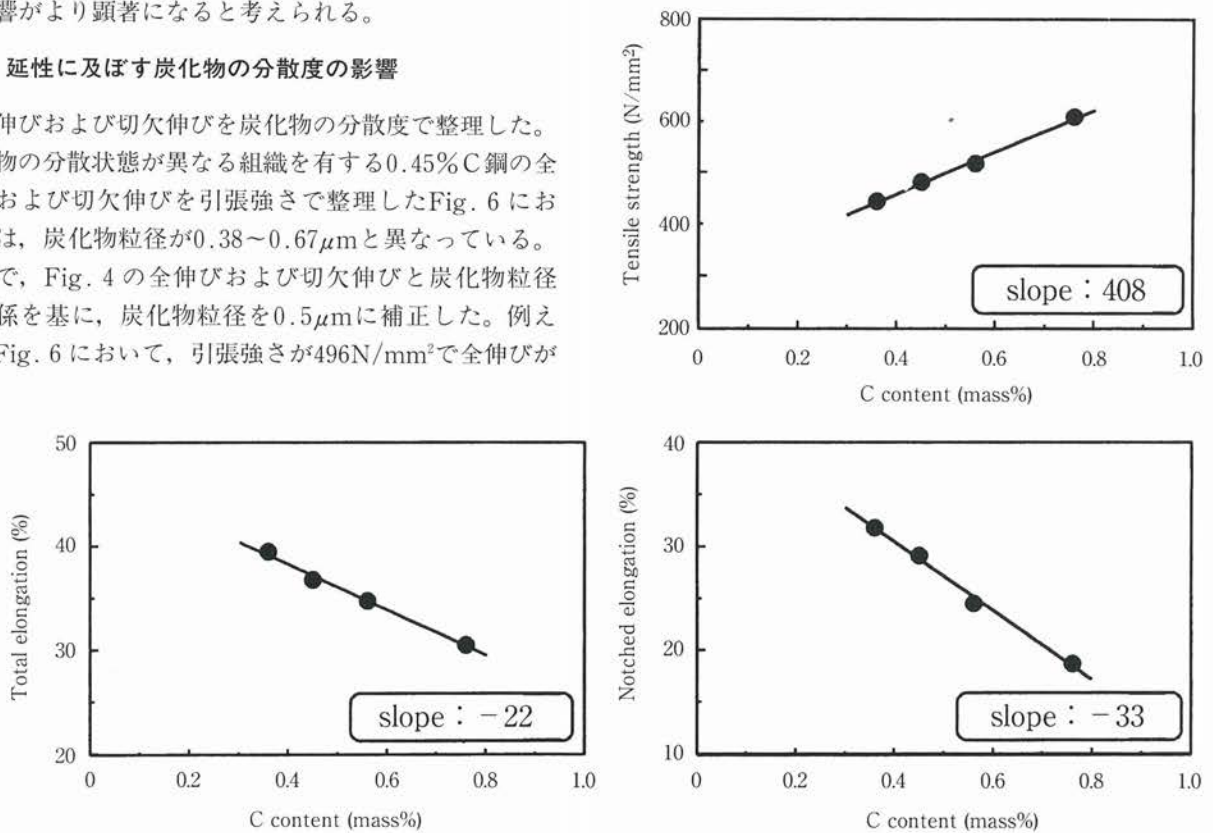


Fig. 9 Effect of C content on mechanical properties in carbon steels having homogeneous dispersion of cementite which mean diameter is  $0.5\mu\text{m}$ .

35.9%の場合、炭化物粒径は $0.41\mu\text{m}$ である。Fig. 4の0.45%C鋼において、炭化物粒径が $0.41\mu\text{m}$ から $0.5\mu\text{m}$ になると、全伸びは2.1ポイント上昇する。したがって、全伸びを38.0%に補正してプロットした。なお、ここでは、球状化率が90%以上の場合について検討した。

全伸びおよび切欠伸びに及ぼす炭化物の分散度の影響

をFig. 10に示す。炭化物の分散度の増加、すなわち分散の不均一化に伴い、全伸びおよび切欠伸びは、いずれも単調に低下する。炭化物の分散度の増加に伴う切欠伸びの低下は、全伸びの低下に比べて大きい。分散度を50%から20%に低下させることにより、全伸びは約35%から約38%とその変化は小さいのに対し、切欠伸びは約22%

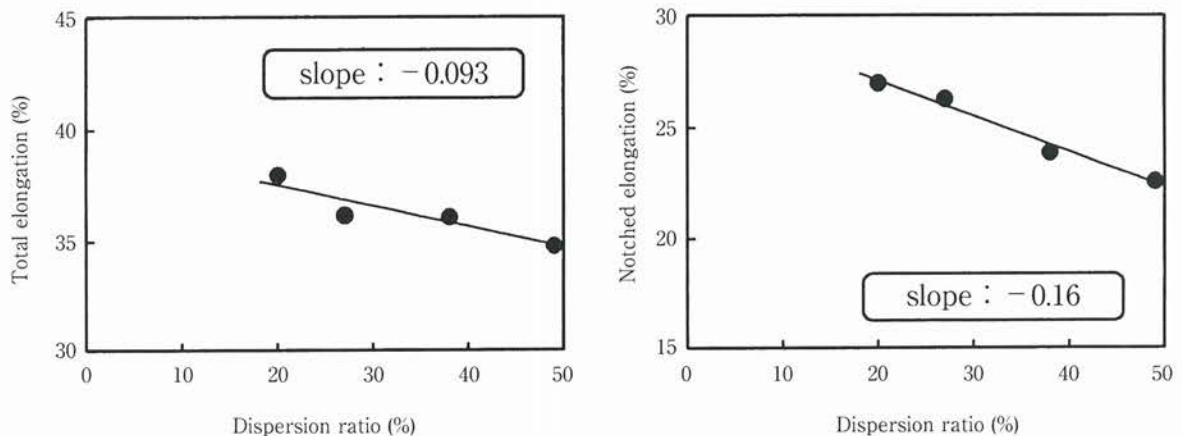


Fig. 10 Effect of dispersion ratio of cementite on elongations in 0.45%C-steel in which mean diameter of cementite is  $0.5\mu\text{m}$  and spheroidizing ratio is above 90%.

から約27%と1.2倍程度向上する。このように、炭化物の粒径および形状を同一として、炭化物の分散度の影響を定量的に把握することにより、炭化物の分散状態は全伸びより切欠伸びに対して、より大きく影響することが明らかとなった。

炭化物の分散が不均一な場合、炭化物が密に存在する部分においては、炭化物数が多い場合と同様に、引張変形に伴う炭化物を起点としたボイドの生成、連結が促進される。このため、4.1節で述べた延性に及ぼすC量の影響と同様に、炭化物の分散度についても全伸びに比べて切欠伸びに及ぼす影響が大きくなったものと考えられる。

#### 4.3 延性破壊形態に及ぼす炭化物形状の影響

切欠引張試験後の破面近傍の断面組織をFig. 11に示す。いずれの断面組織においても、引張変形により炭化物を起点として生成したボイドが観察される。ボイドには、炭化物とフェライトの界面はく離により生じたものと、炭化物が割れて生じたものの両方が認められる。棒状炭化物組織の場合、写真中の矢印で示すように棒状炭化物が分断されて生成したボイドが連結しており、球状炭化物の場合に比べて大きなボイドが生成している。このように、棒状炭化物組織においては、変形に伴うボイドの成長、連結が助長され、Fig. 8 に示したように同一引

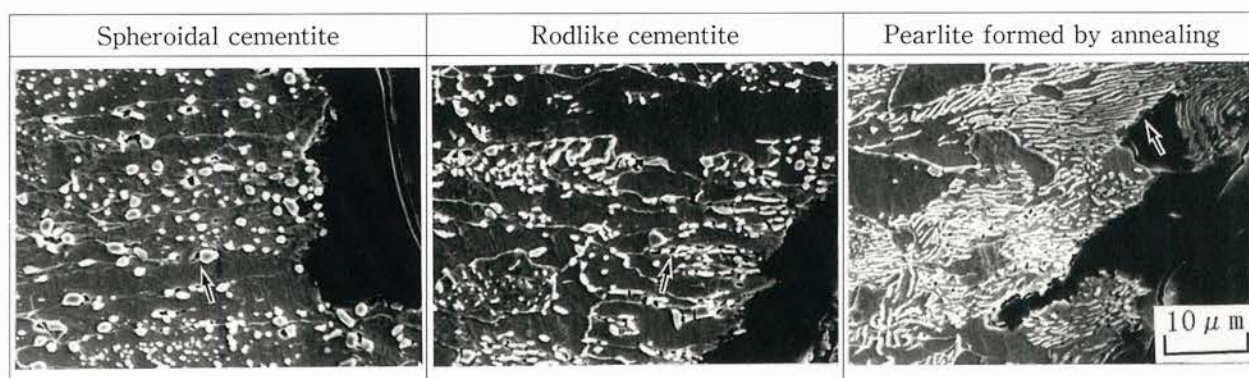


Fig. 11 Microstructures immediately underneath of fracture surface after testing in the notched specimens of 0.45%C-steel.

張強さレベルにおいて、球状炭化物組織に比べて切欠伸びが低下すると考えられる。

また、焼鈍パーライト組織の場合、層状炭化物を横断して生成した大きなボイドが認められる（写真中の矢印）。パーライト組織の場合、延性破壊過程において、パーライト・ノジュールが1つの第2相粒子の単位として働き、ノジュール径程度の大きさのボイドが生成するとされている<sup>2)</sup>。このため、パーライト組織の場合、ボイドの成長、連結が早く、Fig. 8 に示したように伸び値が低下すると考えられる。さらに、パーライト粒が外力を受けたとき、パーライト中のセメンタイト板への応力はパーライトラメラ間隔に比例するとされている<sup>12)</sup>。このため、パーライトラメラ間隔の増加に伴いボイド発生までのひずみは小さくなると報告されている。本実験結果において、熱処理パーライト組織に比べて引張強さが低いにも拘らず、焼鈍パーライト組織の切欠伸びが低くなったのは、焼鈍パーライトのラメラ間隔が大きく、ボイドが低ひずみで発生するためと考えられる。

#### 4.4 延性に及ぼす炭化物の球状化率の影響

4.3節において、切欠引張試験後の破面近傍の断面組

織から、延性に及ぼす炭化物の形状の影響について述べた。ここでは、球状および棒状炭化物組織における延性に及ぼす球状化率の影響について整理した。炭化物の形状が異なる組織を有する0.45%C鋼の全伸びおよび切欠伸びを引張強さで整理したFig. 8 においては、個々のサンプルの炭化物粒径が $0.38 \sim 0.68 \mu\text{m}$ 、炭化物の分散度が20~49%と異なっている。そこで、4.2節の分散度による整理と同様に、Fig. 4 の全伸びおよび切欠伸びと炭化物粒径の関係を基に、炭化物粒径を $0.5 \mu\text{m}$ に補正した。また、Fig. 10の全伸びおよび切欠伸びに及ぼす炭化物の分散度の影響を基に、分散度については35%に補正した。例えば、Fig. 10において、炭化物の分散度が20%の場合、分散度を35%に補正すると、全伸びは1.4ポイント低下する。

Fig. 12に全伸びおよび切欠伸びに及ぼす炭化物の球状化率の影響を示す。炭化物の球状化率の増加に伴い、全伸びおよび切欠伸びはいずれも、単調に上昇する。この炭化物の球状化率の増加に伴う全伸びの変化の傾きは0.12であるが、炭化物の球状化率の増加に伴う切欠伸びの変化の傾きは0.25と大きい。また、球状化率を65%から95%に上昇させることにより、全伸びは約32%から約36%



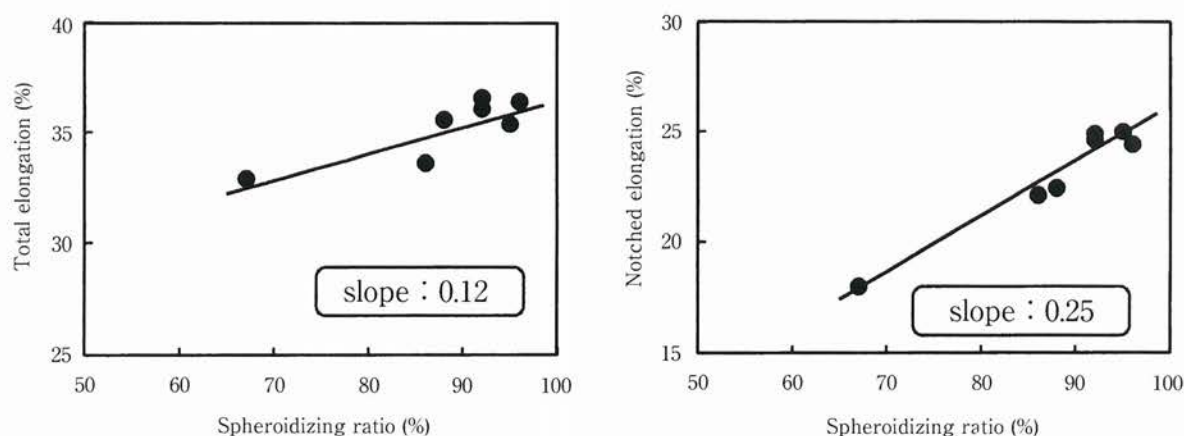


Fig.12 Effect of spheroidizing ratio of cementite on elongations in 0.45%C-steel in which mean diameter of cementite is  $0.5\mu\text{m}$  and dispersion ratio is 35%.

と1.1倍程度しか向上しないのに対して、切欠伸びは約17%から約25%と大きく向上する。このように、炭化物の粒径および分散度を一定として、炭化物の球状化率の影響を定量的に把握することにより、炭化物性状は全伸びより切欠伸びに対して、より大きく影響を及ぼすことが明らかとなった。

以上のように、中・高炭素鋼の延性の向上、特に、切欠伸びに代表される極限変形能の向上には、炭化物の粒径の増加および分散の均一化に加えて、球状化率向上も重要な因子である。

また、機械的性質は、これまで述べてきた炭化物性状以外にも、フェライト性状や介在物の形態等にも影響される。今回の検討では、成分的に介在物の影響は小さいと思われる。しかし、フェライト粒径は、大きく異なる場合もあり、その影響については明確ではない。機械的性質に及ぼすフェライト粒径の影響については、今後検討する必要がある。

## 5. 結 言

中・高炭素鋼において、機械的性質に及ぼす炭化物性状の影響を調査し、以下の結果を得た。

- (1) 炭化物粒径の増加に加えて、炭化物の均一分散および球状化により延性が向上することを定量的に明らかにした。切欠伸びに及ぼす炭化物の分散状態や形状の影響は、全伸びに及ぼす影響に比べて大きい。
- (2) 棒状炭化物組織やパーライト組織の場合、球状炭化物組織に比べて、炭化物を起点としたボイドの生成・成長を助長し、切欠伸びが低下する。

## 参考文献

- 1) 大浜熙久：日新製鋼技報, **31** (1974), 23
- 2) 井上 毅, 落田義隆, 木下修司：鉄と鋼, **61** (1975), 808
- 3) 星野俊幸, 天野虔一, 田畑緯久, 中野昭三郎：川崎製鉄技報, **23** (1991), 105
- 4) 河野 治, 江坂一彬, 加藤征四郎, 阿部 博, 脇田純一, 高橋学, 片上幹史, 原田慎三：製鉄研究, **392** (1988), 15
- 5) 木下正行, 木村 浩, 大沢亜紘一, 大北智良, 大和田浩, 堀 雅司：日本鋼管技報, **145** (1994), 1
- 6) 細野和典, 中川威雄, 吉田清太：塑性と加工, **9** (1968), 637
- 7) 松藤和雄, 内田恭彦, 由田征史, 大沢紘一：塑性と加工, **14** (1973), 201
- 8) 高木節雄：第141・142回西山記念技術講座(日本鉄鋼協会) (1992), 8
- 9) K.E.Puttick：Phil.Mag., **4** (1959), 964
- 10) I.G.Park and A.W.Thompson：Acta Metall., **36** (1988), 1653
- 11) 井上 毅, 木下修司：塑性と加工, **14** (1973), 291
- 12) 井上 毅, 木下修司：鉄と鋼, **62** (1976), 875