

鋼のオーステナイト域における P, C の平衡
および非平衡粒界偏析挙動阿部 隆*・東田幸四郎*²・田川寿俊*³・小指軍夫*³Equilibrium and Non-equilibrium Grain Boundary Segregation Behavior of
Phosphorus and Carbon in Austenitic Region of Steel

Takashi ABE, Koshiro TSUKADA, Hisatoshi TAGAWA and Isao KOZASU

Synopsis:

Auger electron microscopic analyses were performed to clarify the grain boundary segregation behavior of phosphorus and carbon in the austenitic region of steel. Grain boundary migration during grain growth and recrystallization gave rise to non-equilibrium segregation which resulted in a higher solute concentration on grain boundaries than that of equilibrium segregation. The increment of segregation caused by migration depended on the boundary migration velocity. Faster migration brought about greater concentrations for velocities less than a critical value, which depended on the diffusivity of solute. In recrystallization, faster diffusing elements such as carbon segregated with higher concentrations. It was suggested that the solute sweep effect during grain boundary migration caused the non-equilibrium segregation.

Key words: grain boundary; segregation; austenite region; boundary migration; solute drag effect; recrystallization.

1. 緒 言

オーステナイト (γ) 域における固溶元素の粒界偏析は、鋼の変態特性、脆性挙動等に大きな影響をおよぼす。種々の元素が γ 域において粒界偏析することが知られているが、従来、特に注目されているのは P, S, Sb 等の不純物元素である^{1)~3)}。また、オージェ電子分光分析を用いた C, Mn, B の偏析の直接的な確認も報告されている。ERHART らは²⁾、350°C 脆化との関連で γ 域における P の偏析について検討し、須藤らは¹⁾他の合金元素を含めて偏析挙動の系統的な検討を行つている。これらは現象の理解に有益な知見を与えている。一方、偏析機構についてはフェライト (α) 域において平衡偏析理論⁶⁾および非平衡偏析理論⁷⁾の双方が提唱され、また粒界面の性状により偏析挙動が異なるという興味ある知見が得られている⁸⁾ものの、 γ 域において機構的な検討を取り扱った研究はほとんど見受けられない。 γ 域においては α 域と異なり炭化物の生成が一般に生じ難いため、従来の現象が平衡偏析によりおおむね理解されることに

起因しているものと思われる。しかしながら、 γ 域における粒界偏析を論じる場合、高温下での粒成長および加工後の再結晶による粒界移動の容易さは欠かすことのできない要因である。このような粒界移動を伴う場合に粒界偏析がどのように変化するかは興味ある問題であるが、従来この点に関する直接的な検討はなされていない。

以上の背景の下に、本研究では γ 域での粒界偏析挙動およびその機構を明確化することを目的として、オージェ電子分光分析を用いて P, C の偏析挙動について検討を行つた。特に、粒成長、再結晶といった粒界面の移動を伴う現象に着目し、平衡、非平衡偏析両面からの検討を加えた。

2. 実験方法

供試鋼の化学成分を Table 1 に示す。表中には at% とともに () 内に wt% で成分濃度が表示されている。基本成分は 0.40 wt% C-0.25 wt% Si-1.0 wt% Mn 鋼 [JIS S 40 C 相当] であり、P 量を 0.007~0.190 wt% (0.012~0.334 at%) の間で調整している。

昭和 59 年 10 月本会講演大会にて発表 昭和 63 年 1 月 6 日受付 (Received Jan. 6, 1988)

* NKK 鉄鋼研究所 (Steel Research Center, NKK Corporation, 1-1 Minamiwatarida-cho Kawasaki-ku Kawasaki 210)

*2 NKK 研究総務部 (Research Administration Dept., NKK Corporation)

*3 NKK 鉄鋼研究所 工博 (Steel Research Center, NKK Corporation)

Table 1. Chemical composition, at% (wt%).

Steel	C	Si	Mn	P	S	Sol. Al	T. N.
A	1.953 (0.428)	0.49 (0.25)	1.22 (1.22)	0.0124 (0.007)	0.0082 (0.0048)	0.063 (0.031)	0.0282 (0.0072)
B	1.916 (0.420)	0.49 (0.25)	1.19 (1.19)	0.0814 (0.046)	0.0077 (0.0045)	0.059 (0.029)	0.0348 (0.0089)
C	1.763 (0.386)	0.51 (0.26)	1.19 (1.19)	0.1735 (0.098)	0.0079 (0.0046)	0.057 (0.028)	0.0290 (0.0074)
D	1.919 (0.421)	0.53 (0.27)	1.15 (1.15)	0.3358 (0.190)	0.0074 (0.0043)	0.047 (0.023)	0.0266 (0.0068)

Table 2. Condition of Auger electron spectroscopy.

Accelerated voltage (kV)	Absorbed current (nA)	Sweep rate (eV/s)	Vacuum (Torr)	Time constant (s)	Sensitivity (mV)	Sputtering	
						Accelerated voltage (kV)	Gas
10	100	1.7	$3\sim 6 \times 10^{-10}$	10	3.0	4.5	Ar

供試鋼は 50 kg 大気溶解炉にて実験室溶解したものであり、10 kg 鋼塊にそれぞれ分注した。造塊後、1250°Cにて 2 h 加熱保持し分塊圧延 (80-40 mm t) を施し、さらに 1250°Cにて 1 h 加熱し仕上圧延 (40-14 mm t) を実施した。小型鋼塊への造塊、および高温加熱にて分塊・仕上圧延の二工程の圧延を施したのは、いずれもセミマクロ偏析の軽減と均一化のためである。

圧延後の供試鋼の板厚中心部から、オージェ電子分光分析用試料を採取し、高周波誘導加熱装置により Fig. 1 に示される種々の熱サイクルを施した。その後、オージェ電子分光分析装置内で試験片を液体窒素により冷却し、高真空下で破壊した破面のオージェ電子分光分析を行った。本実験で用いた測定条件を Table 2 に示す。10⁻¹⁰ Torr の良好な真空度が確保されている。

本実験で用いたオージェ電子分光分析は通常行われているマイクロビームによる点分析ではなく、100 μ m 平方の面分析を主体として行った。これは 3 \cdot 1 で後述されるように、粒界面により偏析量が異なることが示されているためであり、複数の粒界面からの平均情報を得ることを意図したものである。ただし、破面にへき開面を含む場合にはマイクロビームを用い、点分析により粒界とへき開面に分離して測定を行った。同一破面より位置を変えて二箇所以上の測定を行い、オージェスペクトルからピーク高さの比である I(P)/I(Fe), I(C)/I(Fe) を測定して偏析挙動を調査した。一部の試料については偏析層の厚さを調査する目的でアルゴンスパッタリングを実施し測定を行った。

さらに、熱間加工時の再結晶による偏析の変化を調べるため、Fig. 1(d)に示される条件で処理を行い、加工前後の粒界偏析の変化を、組織観察およびオージェ電子分光分析により調査した。組織観察はピクリン酸に界面

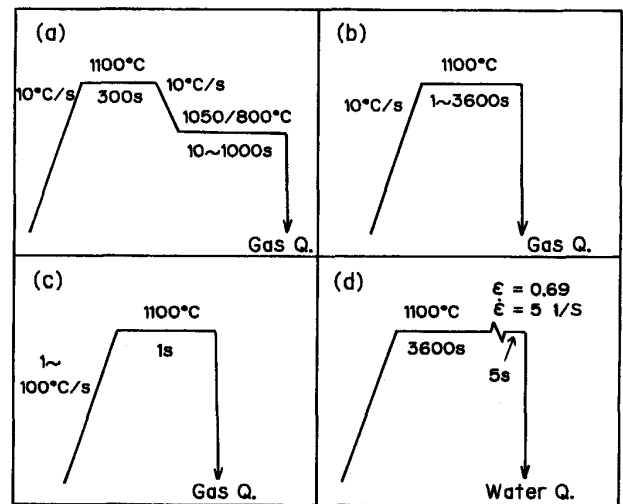


Fig. 1. Condition of heat cycles, (a) step cycle, (b) (c) single cycle and (d) cycle with deformation.

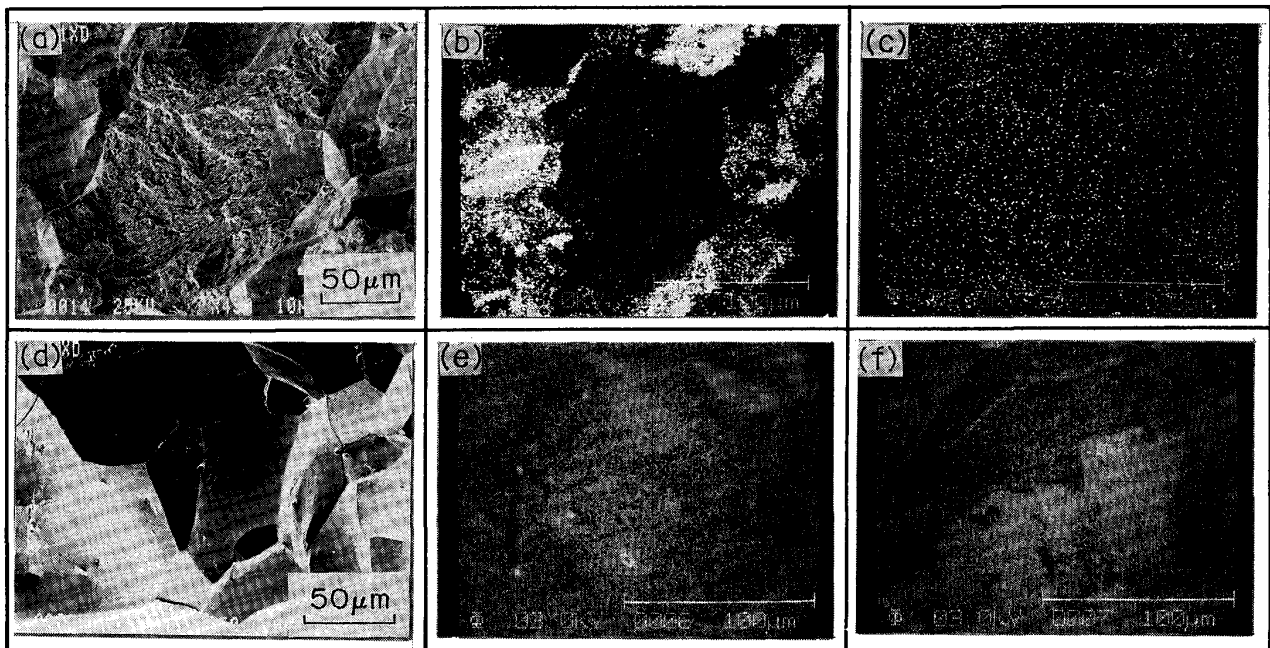
活性剤を添加したエッチング液により、旧 γ 粒界を現出させて行った。なお、組織凍結のための冷却は He ガスまたは水焼入れにより行ったが、いずれも 100°C/s 以上の冷却速度が確保されている。

3. 結 果

3.1 オージェ電子分光分析

オージェ分析破面の一例として Photo. 1 に A 鋼 (0.012 at% P), D 鋼 (0.334 at% P) の結果を示す。P 量の最も少ない A 鋼の場合は (a) に示されるようにへき開面を一部含んだが、その他の鋼種では (d) に示されるような 100% の粒界破面が得られた。(b) (c), (e) (f) はそれぞれの破面に対応する C および P の偏析状況を示すものである。

(b) は粒界およびへき開を含む破面での C の偏析状



(a) (b) (c) : Steel A [1.95 at % C - 0.012 at % P] (d) (e) (f) : Steel D [1.92 at % C - 0.334 at % P]
 (a) (d) : SEM (b) (e) : Carbon image (c) (f) : Phosphorus image
 Heat treatment : 1100°C × 1 s

Photo. 1. SEM observation and Auger electron spectroscopic image on fracture surface.

況を示している。粒界面には偏析が認められるものの、へき開面からは C が感知されていない。このことは、C の粒界偏析が生じていることを直接示すとともに、高真空度のため破壊後に破面が汚染されていないことを表している。(e) (f) は粒界破面上における C と P の偏析状態を示したものである。C, P ともイメージに濃淡が見られ偏析が均一でないことが示されている。(d) の SEM 像と対応させると、粒界面によって偏析量に相異が認められることがわかる。従つて、点分析では粒界面の差に起因したばらつきが生ずるため、本実験では粒界面数個を含むような 100 μm 平方での面分析を用いた。

3.2 偏析におよぼすバルク濃度の影響

1100°C に加熱後 900°C に 1000 s 保持した条件の試料を用い、バルク中の P 濃度と粒界に偏析する P, C 量との関係を求めた。Fig. 2 に示されるように、バルクの P 濃度と $I(P)/I(Fe)$ で代表される粒界偏析 P 量とが比例することがわかる。また、図中には焼もどし脆化における偏析量 (α 域) と比較する意味で、500°C × 500 h の焼もどし処理を施した場合の結果が破線で示されている。これより、 γ 域で偏析する量は α 域での平衡偏析量の約 1/2~1/3 程度であるといえる。これらの結果は須藤らの報告¹⁾と良く一致する。

次に、C の偏析について着目すると、バルクの C 濃

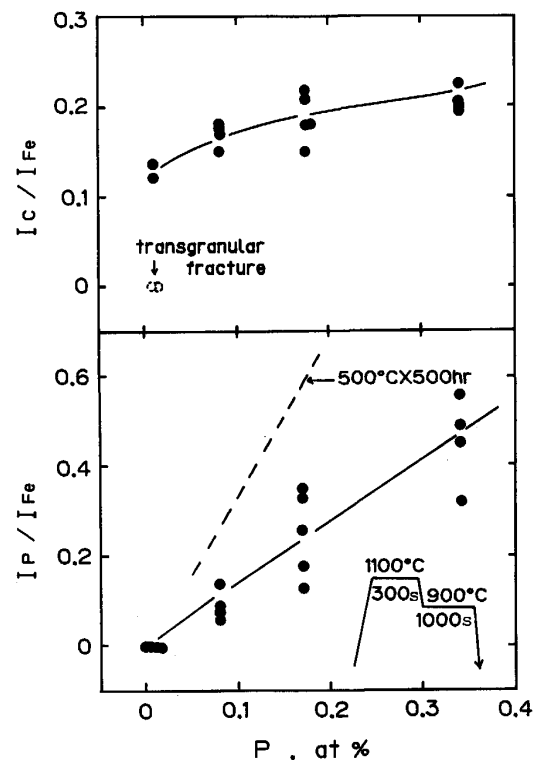
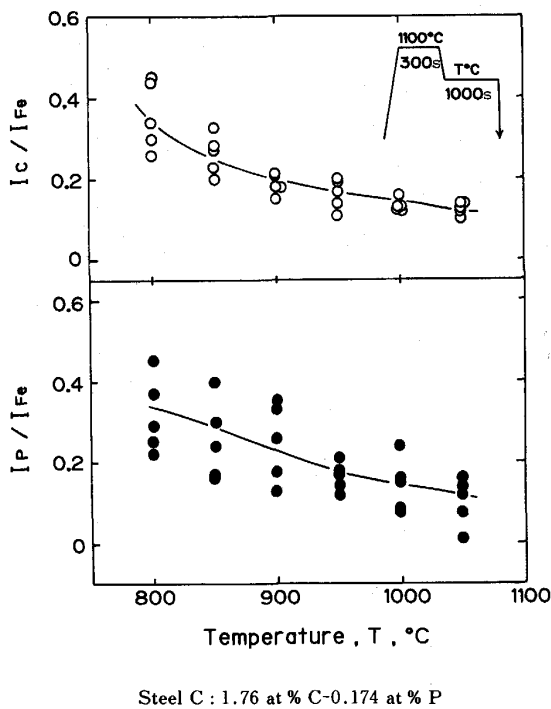


Fig. 2. Effect of phosphorous content on P and C segregation.

度はほぼ一定であるにもかかわらず、P 濃度の増大に伴つて粒界偏析 C 量も増加する傾向が認められる。こ



Steel C : 1.76 at % C-0.174 at % P
Fig. 3. Effect of holding temperature on segregation of P and C.

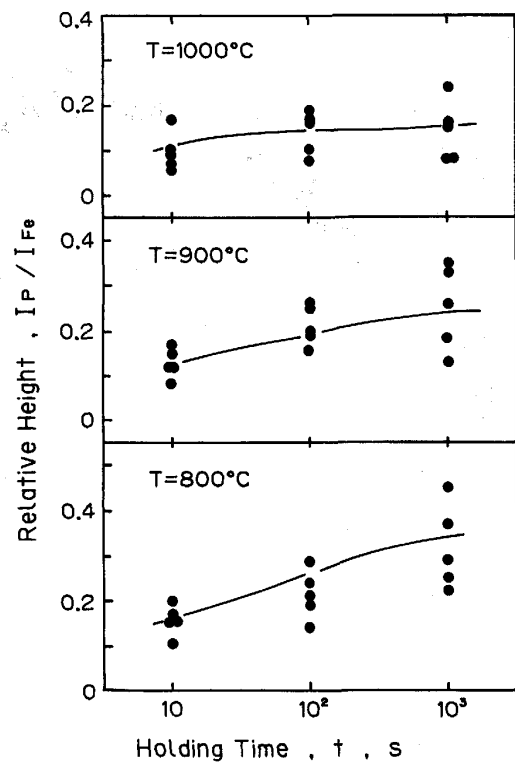
のことは、粒界偏析するPとCとが相互作用を有していることを示すものであるといえる。

なお、測定されているP、Cが粒界偏析であることを確かめるため、一部の試料についてスパッタリングを行った。その結果、短時間のスパッタリングによりP、Cとも偏析量が減衰することを確認している。

3.3 偏析におよぼす保持温度、保持時間の影響

保持温度による粒界偏析量の変化を検討するため、C鋼(0.174 at% P)を用い1100°C 300 s保持の粒調整を行った後、二段目の保持温度を900~1050°Cの間で変化させ、粒界偏析量の測定を行った。Fig. 3に示されるように、P、Cとも本実験の範囲では二段目の保持温度の低下とともに粒界偏析量が増していることがわかる。

次に保持時間を種々変化させ、その影響を調べた。C鋼(0.174 at% P)を800°C~1000°Cに10~1000 s保持した際の偏析量の変化をFig. 4に示す。保持時間の増大とともに偏析量が増加している傾向が認められる。各温度での最大偏析量に達するためには時間の経過が必要であることから、Pの γ 粒界への偏析は拡散律速過程であるといえる。Fig. 4の結果は1100°Cに一度加熱し、その後より低温度で保持するという二段加熱処理の結果であるが、次に、1100°Cに加熱し同温度に1~3600 sの範囲で保持して、その間の偏析量の変化を調



Steel C : 1.76 at % C-0.174 at % P
Fig. 4. Change in phosphorus concentration with holding time in step heat cycle.

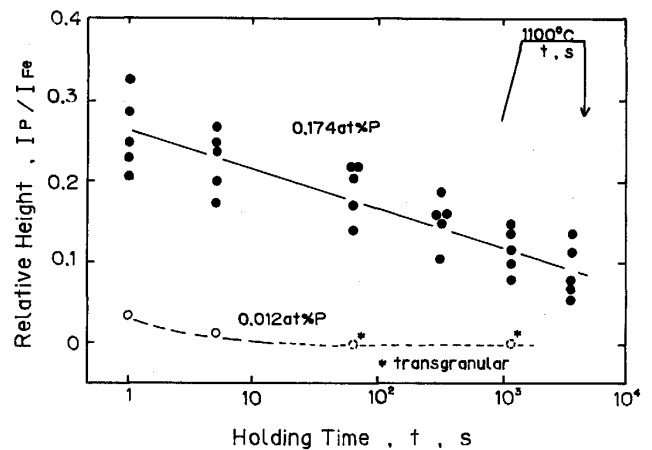


Fig. 5. Change in phosphorus concentration with holding time in single heat cycle.

査した。Fig. 5に結果を示すが、Fig. 4に示される二段加熱の場合とは全く逆に、保持時間の増加に伴って粒界偏析量が減少する傾向が得られている。また、保持時間がわずか1 sという短時間においてもすでに粒界に多くの偏析が生じているのが特徴である。また、A鋼(0.012 at% P)について5 s以下の短時間保持において一部粒界破面が認められたが、60 s以上保持した場

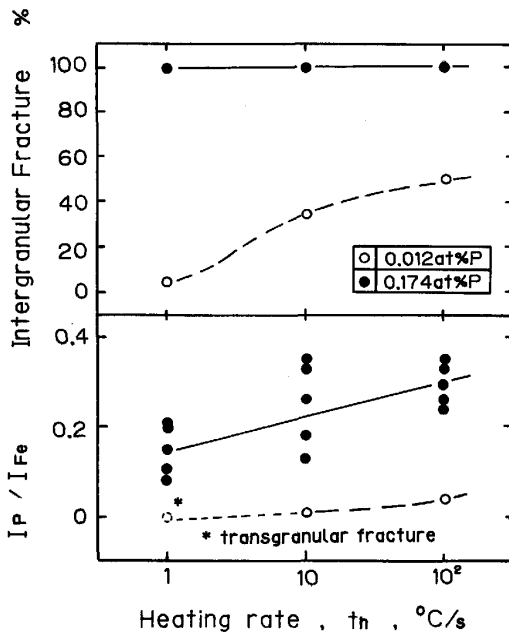


Fig. 6. Change in phosphorus segregation and fracture appearance with heating rate.

合には粒界破面が全く生じなかつた。粒界破面の生成しやすさは粒界偏析量と対応すると考えられることから、粒界破面率の減少からも保持時間の増加につれて偏析量がむしろ減少することが示される。

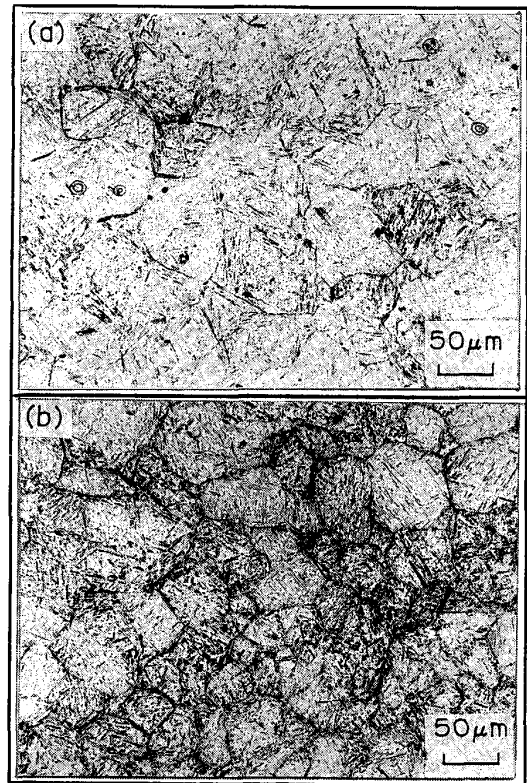
3.4 偏析におよぼす加熱速度の影響

1100°C 一段保持の条件について加熱速度を 1~100°C/s の範囲で変化させ偏析挙動への影響を調べた。Fig. 6 に A 鋼 (0.012 at% P), C 鋼 (0.174 at% P) についての結果を示す。両鋼種とも粒界偏析量は加熱速度依存性を示し、加熱速度が増すにつれて偏析量が増加した。C 鋼においては加熱速度が 1°C/s から 100°C/s へと変化したことにより粒界偏析量は約 70% 増加した。

一方、A 鋼においては 1°C/s のゆっくりとした加熱速度の条件では粒界破壊が生じがたく、ほとんど粒内破壊を呈したが、加熱速度の増加にともなつて粒界破面が容易に認められるようになった。全破面上に占める粒界破壊率を定量化し加熱速度との関係として同図中に図示した。加熱速度が 1°C/s から 100°C/s へと増加するにつれて粒界破面率は 5% から 50% へと増している。粒界偏析量および粒界破面率の測定から加熱速度の増大は粒界偏析量の増加をもたらすことが認められている。

3.5 再結晶による偏析量変化

γ 域における圧延加工-再結晶後の粒界偏析の状態変化について検討を加えるため、加工前後の粒界偏析を調査した。Fig. 1 に示されるように、C 鋼を 1100°C に



(a) 1100°C × 3600 s
(b) 1100°C × 3600 s-50% hot rolling-1100°C × 5 s
Steel C: 1.76 at% C-0.174 at% P

Photo. 2. Effect of recrystallization on the etching sensitivity of prior austenite grain boundary.

3600 s 加熱し急冷した試料と、加熱保持後圧下量 50% の熱間圧延を施し 5 s 後に急冷した試料とを比較調査した。

まず、ピクリン酸によるエッチング組織を観察した。同一条件で同時にエッチングした場合の観察例を Photo. 2 に示す。加工を施し再結晶を起こさせた方が旧 γ 粒界が明瞭に現出している。このことは再結晶により偏析が増加することを示唆するものであるといえる。さらに、偏析量の変化を定量的に検討するためオージェ分析により粒界偏析量の測定を行った。A~D 鋼について P, C の再結晶に伴う偏析量の変化を調べたが、Fig. 7 にバルク P 濃度との関係としてその結果を示した。P, C とも加工再結晶により偏析量が著しく増大していることが示されている。P 濃度にもよるが加工を施す前に比べ 2~4 倍の偏析量の大幅な増加をもたらされていることがわかる。さらに、P については再結晶後も P 濃度と粒界偏析量とが比例関係にあることが認められる。

以上の結果は、再結晶により粒界偏析が促進されるこ

Table 3. Summary of results.

	Step heat cycle (Without G. B. migration)	Single heat cycle	Heat cycle with deformation
		(G. B. migration with grain growth)	(G. B. migration with recrystallization)
Effect of bulk content	Bulk content \propto G. B. concentration	Bulk content \propto G. B. concentration	Bulk content \propto G. B. concentration
Temperature dependence	Lower temperature → Increase of concentration	—	—
Time dependence	Longer time → Increase of concentration	Longer time → Decrease of concentration	—
Segregation layer	Extremely thin	Extremely thin	Extremely thin
Heating rate dependence	—	Higher heating rate → Increase of concentration	—
Mechanism	Equilibrium segregation	Non-equilibrium segregation	

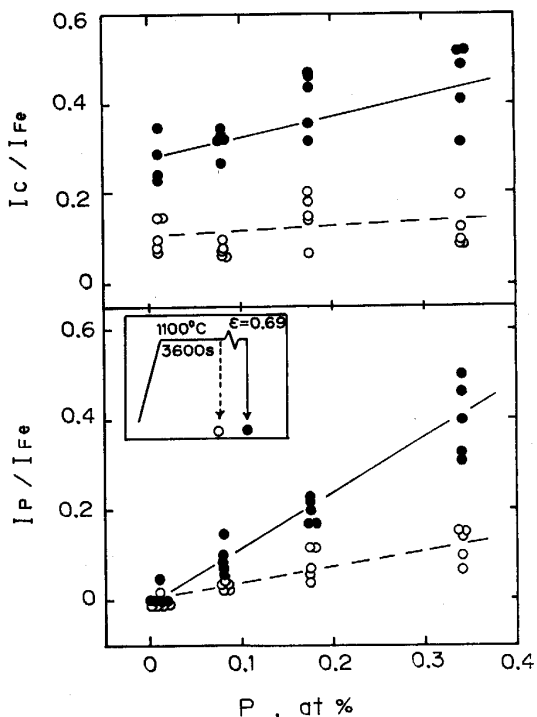


Fig. 7. Change in concentration of phosphorus and carbon with recrystallization of austenite grain.

とを示すものである。再結晶後の粒界は偏析のない“Fresh boundary”ではなく、むしろ固溶元素の偏析が多いことを示す直接的な結果といえる。

4. 考 察

4.1 γ 域における粒界偏析機構

粒界偏析機構について α 域においては平衡偏析理論、非平衡偏析理論の双方が提唱されているが、ここでは γ 域における粒界偏析機構について考察する。

本実験で得られた各因子の粒界偏析に対する影響を Table 3 にまとめて示す。表中には、二段加熱処理、一

段加熱処理および再結晶の場合に分類して示してある。加熱実験条件で大きく異なっているのは時間依存性であり、二段加熱の場合には保持時間の増加に伴って偏析量が増すのに対し、一段加熱の場合には逆に保持とともに偏析量が減少している。従って、両条件では基本的な偏析機構が異なっていることが推察されるので、以下場合分けして考察する。初めに、二段加熱の場合について検討する。この場合の偏析挙動の特徴は①偏析量がバルク濃度に比例する、②温度が低くなるほど偏析量が増す、③保持時間の増加とともに偏析量が増す、④偏析層は極めて薄い、ということである。これらの特徴はいずれも α 域における平衡偏析の特徴と類似しており、McLEANの平衡偏析理論⁶⁾により矛盾なく説明される。 α 域の焼もどし脆性域における偏析に関しては平衡偏析的な考え方⁷⁾とがあるが、 γ 高温域においてはセメンタイトの生成が起こらないため、炭化物が関与した非平衡偏析は生じ難いと考えられる。

次に、一段加熱の場合について検討を進める。この場合の大きな特徴は①保持時間とともに偏析量がむしろ減少すること、②加熱速度依存性を示し加熱速度が大きいほど偏析量が増加する、ということである。これらの現象は、先に述べた平衡偏析理論によつては説明できない。従つて、この場合には何らかの形で非平衡的に偏析が生じているものと考えられる。非平衡偏析の具体的内容については(1) α - γ 間での濃度分配、(2) γ 界面移動のときの“Sweep”効果、の二つが可能な機構として考えられる。以下、それぞれの機構の妥当性について検討する。

P の固溶度は γ 域に比べ α 域の方がはるかに高い。従つて、加熱過程で生ずる α - γ 二相域においては α の方へ P がより濃化する傾向を持つ。この濃度分配による成分偏析が γ 単相域の粒界偏析に受け継がれる、とす

るのが (1) の考え方である。しかしながら、本実験条件範囲では加熱中の ($\alpha + \gamma$) 二相状態がごく短時間であり、P の α 中への拡散は十分に生じていないと思われる。従つて、この場合の偏析機構としては考え難い。

(2) の γ 界面移動に伴う Sweep 効果については Fe を不純物元素とした Al あるいは W において二、三の報告が見られる^{9)~11)}。本実験の場合、一段加熱途上における γ 粒成長、あるいは加工再結晶における γ 粒界移動において偏析が助長されると考えるものである。固溶元素が粒成長を抑制する¹²⁾こと、および、 γ の再結晶挙動に対し、Mo, Nb 等の固溶原子が抑制効果を有すること¹³⁾は“Solute drag effect”として良く知られる。逆に考えれば、移動時の粒界が固溶原子を引きずつてゆくとも推察されるわけで、これらのことが (2) の考えかたの根拠となつている。また、再結晶の粒界移動によつて固溶原子ではないが微細析出物を集めるといった報告もあり (Fe-3.25% Si)¹⁴⁾、Sweep 効果の考え方を支持するものといえる。

また、直接焼入れ鋼板の強靱化機構として幾つかの機構が類推されているが、それらの中で Sweep 効果の作用が推定されている。再結晶直後に焼入性が最も高く、時間の経過とともに焼入性が低下するという実験結果を Sweep 効果により説明したものである¹⁵⁾。本研究の結果は、その推定を裏づけるものであるといえる。

加工再結晶の場合の非平衡偏析条件と二段加熱の場合の平衡偏析条件とにおける、P と C の偏析量の関係を Fig. 8 に示した。同図より、非平衡偏析の条件においても P と C の偏析には相互作用が認められ、P の偏析量の増加は C の偏析量の増加をもたらすことが示されている。また、二つの条件は同一の関係では整理されず、非平衡偏析の場合の方が上側にバンドが位置している。このことは、再結晶時の粒界移動において P に比べ C の方が粒界上に濃化しやすいことを示すものであるといえる。

4.2 粒界移動速度の影響

Fig. 6 に示すように、加熱速度の増加は粒界偏析の増大をもたらすが、このことから粒界移動速度が偏析挙動に影響をおよぼすことが推察される。加熱速度の変化は γ 粒成長時の粒界移動速度に影響を与え、加熱速度が速いほど粒界移動速度は増すためである。

粒界移動を伴う条件である Fig. 6 および Fig. 7 の結果に基づき、粒界移動速度と粒界偏析量との関係を求めた。結果を Fig. 9 に示す。ここで、粒成長時の移動速度は加熱 γ 粒半径を粒成長時間 [(1100°C - A_{c3})/加熱速度] で除した値であり、また、再結晶時の移動速度は再

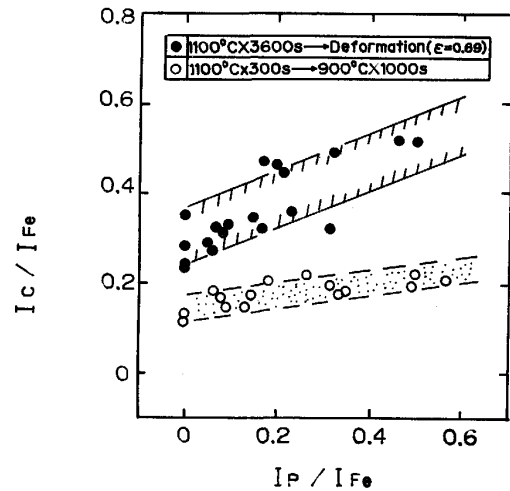
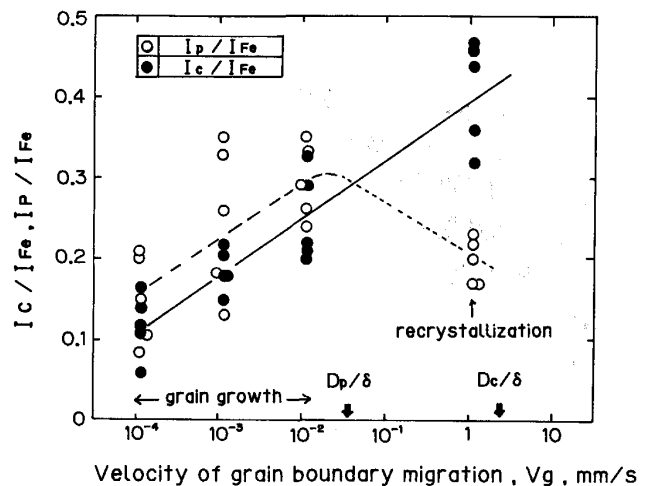


Fig. 8. Relationship between segregation of phosphorus and carbon in recrystallized steels and isothermally reheated steels.



Steel C: 1.76 at % C-0.174 at % P

Fig. 9 Effect of velocity of grain boundary migration on segregation behavior.

結晶粒半径を再結晶完了時間で除した値である。再結晶完了時間は、1100°C と高温のため、ここでは 0.01 s と推定した。

Fig. 9 に示される結果から、C に対しては粒界移動速度 (V_g) の増加は比例的に偏析量の増加をもたらすこと、一方 P に対しては $V_g < 10^{-2}$ mm/s の条件で比例関係が認められるものの、それ以上の粒界移動速度のもとでは、偏析量が逆に減少することがわかる。

粒界偏析に対する粒界移動速度の影響としては、CAHN¹²⁾、GREY ら¹⁶⁾による検討がなされている。CAHN は“Solute controlled boundary migration theories”の中で、偏析量と速度依存性は移動速度が速い場合と遅い場

合とで異なることを示している。すなわち、 $V_g < D/\delta$ (D : 拡散係数, 2δ : 粒界厚さ) という条件の移動速度が遅い場合には偏析量は V_g に比例し、逆に速い場合には反比例することを示している。1100°C における P, C の鋼中の拡散係数 ($D_P = 1.99 \times 10^{-10}$, $D_C = 1.20 \times 10^{-6}$ cm²/s), および粒界厚さ (2δ) を 10 Å と仮定して D/δ を求めると, Fig. 9 の中に示したように $D_P/\delta = 3.98 \times 10^{-2}$, $D_C/\delta = 2.4$ mm/s となる。本実験条件の範囲では C について $V_g < D/\delta$ の条件下であり、一方 P については再結晶時の粒界移動速度のみが $V_g > D\delta$ となる。Fig. 9 に示される結果は, CAHN の示した解析¹²⁾と良い一致を示しているといえる。また, CAHN は粒界移動速度が遅い場合には拡散しにくい元素が偏析しやすくなることを示しているが, Fig. 9 の結果はこの点でも一致している。従つて, 再結晶のように粒界移動速度が早い場合には, C, B のような拡散しやすい元素が γ 粒界に多く偏析すると考えられる。

5. 結 論

γ 域における粒界偏析機構を明確にするため P, C の鋼中における偏析挙動をオージェ電子分光分析により検討した。加工再結晶を含む種々の因子の影響について着目し, 次の結果を得た。

(1) γ 粒界移動が無い場合, P, C は γ 域において平衡偏析する。偏析量はバルク濃度に比例し, また低温になるほど増大する。

(2) 粒成長あるいは再結晶のように γ 粒界移動を伴う場合, 平衡偏析量よりも多くの非平衡的な偏析が生じる。これは, 粒界移動に伴う Sweep 効果により理解される。

(3) 粒界移動による偏析の増加程度は粒界の移動速度に依存し, 移動速度が遅いほど比例的に偏析も増すが,

速い場合は逆に減少する傾向を示した。再結晶のように移動速度が極めて速い場合には, C のように拡散しやすい元素がより多く偏析する。

(4) 平衡, 非平衡にかかわらずバルク P 濃度の増加は, P のみでなく C の粒界偏析増加ももたらした。P と C とは相互作用を有し, γ 域においては共偏析挙動を示す。

文 献

- 1) 須藤 一, 竹澤 博: 日本金属学会誌, 41 (1977), p. 1166
- 2) H. ERHART and M. PAJU: Scr. Metall., 41 (1977), p. 116
- 3) H. ERHART, H. J. GRABKE, W. HARTWECK, J. KRÜPPER and R. MÖLLER: Technische Forschung Stahl (1982), p. 62
- 4) 須藤 一, 吉田光彦: 日本金属学会誌, 41 (1977), p. 1278
- 5) T. INOUE, K. YAMAMOTO and S. SEKIGUCHI: Trans. Iron Steel Inst. Jpn., 14 (1974), p. 32
- 6) D. MCLEAN: Grain Boundary in Metals (1957), p. 116 [Clarendon Press, Oxford]
- 7) J. R. RELICK and C. J. MCMAHON, Jr.: Metall. Trans., 5 (1974), p. 2439
- 8) S. SUZUKI, K. ABIKO and H. KIMURA: Scr. Metall., 15 (1981), p. 1139
- 9) M. MENYHARD and L. URAY: Scr. Metall., 17 (1983), p. 1195
- 10) M. B. KASEN: Acta Metall., 31 (1983), p. 489
- 11) C. G. SHIRLEY: Acta Metall., 26 (1978), p. 391
- 12) J. W. CAHN: Acta Metall., 10 (1962), p. 789
- 13) S. YAMAMOTO, C. OUCHI and T. OSUKA: Proceedings of "The International Conference on the Thermo-mechanical Process of Microalloyed Austenite" (1981年8月), p. 613 [The Metallurgical Society of AIME]
- 14) H. NAKAE and K. TAGASHITA: J. Jpn. Inst. Met., 35 (1971), p. 683
- 15) 小松原望, 渡辺征一, 大谷泰夫: 鉄と鋼, 69 (1983), p. 975
- 16) E. A. GREY and G. T. HIGGINS: Acta Metall., 21 (1973), p. 309