

論 文

ボロン鋼における脱ボロン現象とその計算モデル

井上 毅*・落田 義隆*²・辻 邦夫*

Deboronation in Boron Steel and a Model for Its Calculation

Tsuayoshi INOUE, Yoshitaka OCHIDA, and Kunio TSUJI

Synopsis :

Deboronation behavior during austenitizing of 0.2%C-0.85%Mn boron-treated steels was investigated in the various atmospheres. A considerable amount of boron removal was observed during the heat treatment in the air, and neither an atmosphere of argon nor a nickel-plating on metal surfaces had detectable effect in preventing this phenomenon. Deboronation could be eliminated only in the vacuum of 10^{-4} Torr with a zirconium oxygen getter.

Boron concentration profiles after deboronization occasionally showed some anomalous appearances which were unexplainable by a diffusion control mechanism. One was a two-step fashion in a boron concentration profile and the other was an enhancement of deboronization at a certain temperature range. The latter, for instance, involved a lower residual boron concentration at 850°C rather than at 950°C.

A probable model for deboronization kinetics was discussed taking a dissolution of fixed boron as precipitates together with a diffusion of free boron into consideration. In addition, the effect of formation of ferrite owing to a simultaneous occurrence of decarburization was also taken into consideration. A finite-difference method was applied to the calculation of boron profile and it was shown that the above-mentioned anomalous phenomena were predictable.

1. 緒 言

近年、省資源の観点から機械構造用鋼にボロンを添加した鋼を用いることが多い。これは、ボロンが微量添加により鋼の焼入性を著しく向上し、熱処理特性を改善する目的で添加されていた高価な合金元素の節約が可能となるためである。

ところが、ボロン鋼の熱処理に際して、特にオーステナイト温度域に加熱した場合に表面近くのボロン量が減少する、いわゆる脱ボロン現象が起こることが知られている¹⁾²⁾。また、この脱ボロンは熱処理雰囲気を調整するなどの工業的規模で実施可能な対策で阻止することは困難とされている²⁾。

一方、ボロン鋼の焼入性はボロン量に比例するものではなく、ある一定量のボロンが有効に残存していれば十分に焼入性を確保することができる。このため、実際問題としては、熱処理温度や時間から処理後の鋼材表面近くのボロンの濃度分布を計算により予測でき、表面からの各位置でボロンがどの程度残存しているかを知ることができれば、脱ボロンによる影響に対して適切な処置をとることも可能となる。

ところが、実際に脱ボロン後の鋼材表面近くのボロン

濃度分布を測定して見ると、きわめて複雑な変化を示し、単純な拡散方程式から求められたものとは一致しないことが多く、脱ボロン現象にともなうボロン濃度分布の定量的な予測手段がないのが現状である。

本研究では、0.2%C-0.85%Mn系の機械構造用マンガノンボロン鋼を用い、主としてAr雰囲気中で加熱温度、時間を変えて熱処理を行い、処理後のボロン濃度分布と処理条件の関係について調査した。また、これらのデータをもとに、表面近くでの脱ボロン現象の機構を考察し、ボロン濃度分布の計算モデルを検討し、差分法を用いた数値計算により実測値に近い予測ができることを示した。

2. 実 験 方 法

2.1 供試材

供試材は0.2%C-0.85%Mn系ボロン鋼で、その化学組成をTable 1に示す。MB鋼はボロンを13ppm含有する市販鋼であり、35mmφ圧延鋼棒を用いた。HB鋼は、ほぼ同一成分系であるがボロン含有量を31ppmとした高ボロン鋼で、実験用高周波溶解炉で100kg鋼塊から熱間鍛造により35mmφに鍛伸した鋼棒を用いた。

昭和56年11月本会講演大会にて発表 昭和57年12月23日受付 (Received Dec. 23, 1982)

* (株)神戸製鋼所中央研究所 工博 (Central Research Laboratory, Kobe Steel, Ltd., 1-3-18 Wakinohama-cho Chuo-ku Kobe 651)

*² (株)神戸製鋼所中央研究所 (Central Research Laboratory, Kobe Steel, Ltd.)

Table 1. Chemical compositions of steel (wt%).

Steel	C	Si	Mn	P	S	Cr	Al	Ti	B
MB	0.19	0.23	0.89	0.013	0.016	0.16	0.021	0.022	0.0013
HB	0.20	0.24	0.87	0.009	0.011	0.01	0.029	0.019	0.0031

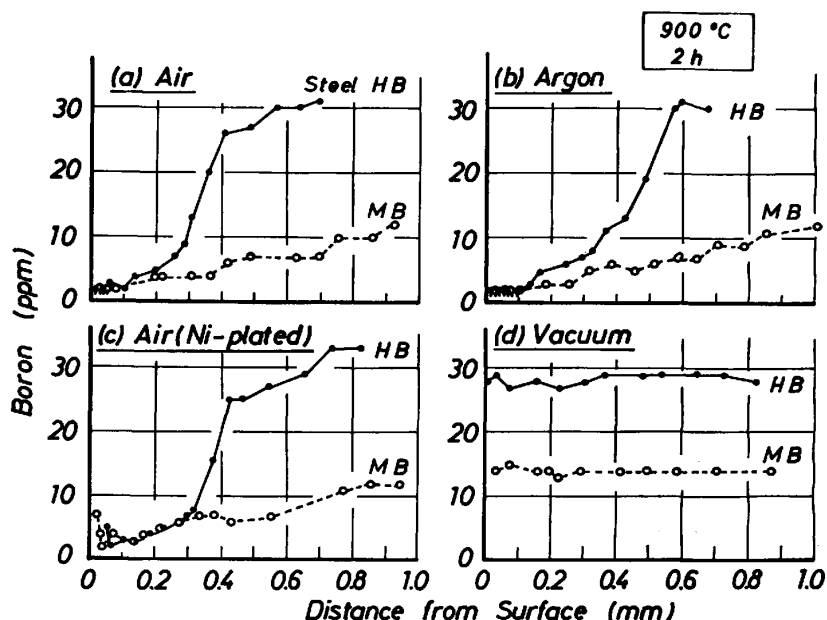


Fig. 1. Boron concentration profiles near surfaces of specimens heated at 900°C for 2h in various atmospheres.

両鋼とも 35 mmφ の状態で 900°C, 1 h の焼ならし処理を行つたのちに、表面の影響層を除去するために機械加工により 30 mmφ まで表面を研削し、30 mmφ × 28 mm 高さの円柱形試験片とした。この状態において中心から表面までボロンおよび炭素濃度が一定であることを確認して次に示す脱ボロン熱処理用の素材とした。

2.2 脱ボロン熱処理

脱ボロン挙動におよぼす熱処理雰囲気の影響を見る目的で、大気中、アルゴン気流中および真空中で、それぞれ 900°C, 2 h の加熱を行つた後水冷した。また表面にめつき処理を行つて脱ボロンが防止できるかどうかを見る目的で、試験片表面に下地処理なしで 15 μ の Ni 膜を付着させたものを同じく大気中で 900°C, 2 h の脱ボロン処理した。

ここで、アルゴン気流中加熱は内容積約 5 000 cm³ の箱形電気炉中に 20 l/min の割合で高純度アルゴンを流して行い、また真空中加熱は 10⁻⁴ Torr に減圧したバイコール管中に、酸素ゲッター用の Zr 箔とともに試験片を封入して行つた。

つぎに、脱ボロン挙動におよぼす加熱条件の影響を見るために、前記と同じアルゴン気流雰囲気中で、加熱温度として 850°C と 950°C の 2 水準、またそれぞれの温度で加熱時間として 30 min, 1 h および 2 h の 3 水準

について処理を行つた。処理後はいずれの場合にも水冷とした。

2.3 ボロン濃度分布の測定

脱ボロン処理後の表面近くでのボロン濃度分布を調べるために、前述の 30 mmφ × 28 mm 高さの円柱試験片の端面を平面グラインダで 10~50 μ 研削するごとに、研削量とその端面でのボロン量の測定を、ボロン濃度がベース濃度にはほぼ回復する深さ(約 1.5 mm)まで繰り返して行つた。端面上でのボロン分析は、円柱試験片断面上の D/4 (D は断面直径)の位置で発光分析装置(島津製カントレコーダ GVM-100)により行つた。なお、本装置でのボロンの分析精度は約 ±0.5 ppm である。

3. 実験結果

3.1 脱ボロン挙動におよぼす加熱雰囲気の影響

Fig. 1 に MB 鋼, HB 鋼を大気中, アルゴン気流中, 真空中で、また Ni めつき材を大気中でそれぞれ 900°C, 2 h の加熱を行つたときの、表面からの距離とその位置でのボロン量の関係(ボロン濃度分布)を示す。また Fig. 2 には、このボロン濃度分布において 50% 脱ボロン位置(脱ボロン後のボロン濃度がベース濃度の 50% となる位置)を各雰囲気ごとに示した。

これらの結果を見ると、MB 鋼, HB 鋼とも大気中、

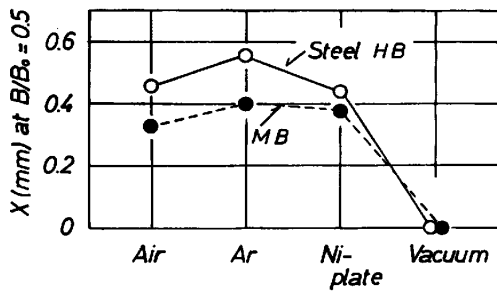


Fig. 2. Deboronation behavior in various atmospheres. The ordinate shows the distance at which boron concentration decreases to 50% of base content.

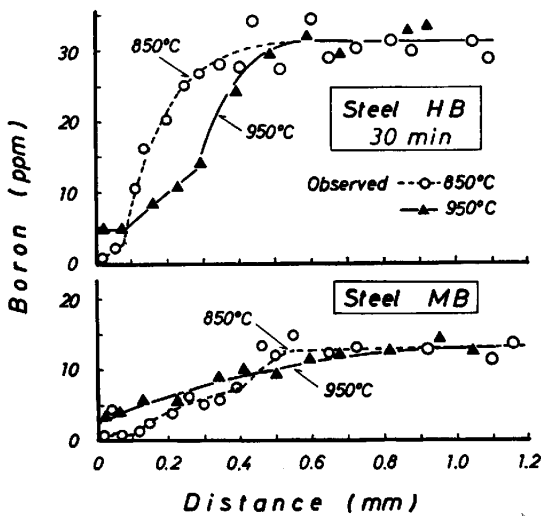


Fig. 3. Boron concentration profiles near surfaces of steels HB and MB at 850°C and 950°C for 30 min in argon flow atmosphere.

アルゴン気流中ではほぼ同じように脱ボロンが起こっており、少々の雰囲気調整程度では脱ボロンを抑える効果はほとんどないといえる。また、試験片に Ni めつきを施したものでも同じように脱ボロンが起こっており、脱ボロン阻止の効果は期待できず、十分な高真空と酸素ゲッタの封入によつてはじめて脱ボロンが阻止できることを示している。

3.2 脱ボロン挙動におよぼす加熱条件の影響

Fig. 3 に MB 鋼, HB 鋼について、加熱温度を 850°C と 950°C に変えて 30 min 加熱した時のボロン濃度分布を、また Fig. 4 および Fig. 5 には、それぞれ同様に 1 h および 2 h 加熱したときのボロン濃度分布を示す。

これらのボロン濃度分布曲線を見ると、個々の位置での分析値にはかなり大きなばらつきが見られるが、例えば脱炭現象などの時に見られるような単純な拡散支配の濃度分布曲線とは異なるいくつかの特異な挙動が観察される。

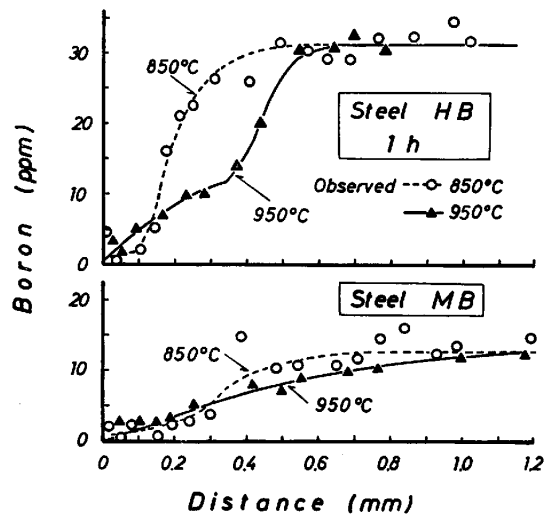


Fig. 4. Boron concentration profiles near surfaces of steels HB and MB at 850°C and 950°C for 1 h in argon flow atmosphere.

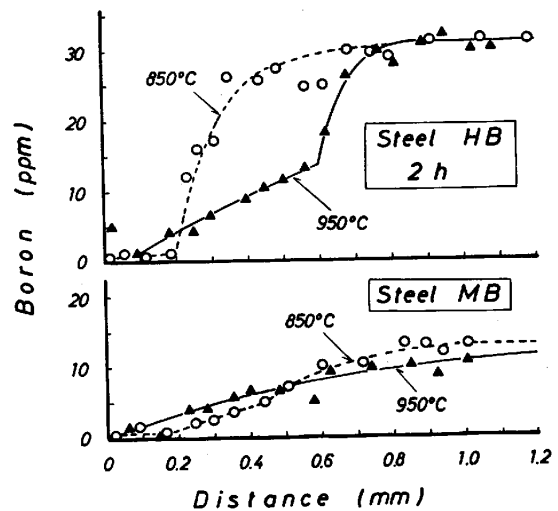


Fig. 5. Boron concentration profiles near surfaces of steels HB and MB at 850°C and 950°C for 2 h in argon flow atmosphere.

まず、ボロン濃度分布が滑らかな曲線を描かずに、途中で折れ曲がり点を示すものがしばしば観察される。このことは、特にボロン含有量の多い HB 鋼において顕著に認められ、例えば 2 h 処理の場合にはつきりと観察されている。この濃度分布の折れ曲がりには単純な拡散機構だけでは説明できないものである。

つぎに、ごく表面近くでのボロン濃度を見ると、処理温度が低い 850°C のときよりも、950°C の方が残存ボロン量が高くなる場合がしばしば見られる。このように、たとえ表面直下といえども、低温処理の方が高温処理よりもボロン量が低くなるという現象は、やはり単純な拡散支配の機構では説明できないものである。

なお、いくつかのボロン濃度分布において、最表面で

異常に高いボロン量が検出されることがあるが、これは表面へ抜け出したボロンが雰囲気中の酸素と化合し酸化物となつて表面に付着したものであろうと思われるが、この点に関してはここではこれ以上調べなかつた。

4. 考 察

以下において、処理条件を変えたときのボロン濃度分布について、分布曲線中の折れ曲がりや、表面直下でのボロン濃度の逆転現象など、単純な拡散機構では説明できない点について考察し、脱ボロンを支配している機構について検討する。さらに、脱ボロン後のボロン濃度分布の予測計算を行うことを目的として、ここで考察した脱ボロン現象の機構をもとにした計算モデルを考え、実際に差分法を適用した数値計算の結果についても述べる。

4.1 濃度分布曲線の折れ曲がりについて

一般に脱炭や浸炭のように、表面から原子が抜けたり浸入する現象に対して、固体内の拡散が支配機構となつている場合には、ある温度 T (K) で時間 t の処理をしたときの表面からの距離 x での着目原子の濃度 $C(x, t)$ は、次の拡散方程式の解で示される。

$$C(x, t) = C_m + (C_s - C_m) \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \right] \dots (1)$$

ここで C_m は母相中のベース濃度、 C_s は表面での濃度(雰囲気ポテンシャルと平衡する濃度)である。 D はそのときの温度で定まる拡散係数で、定数 D_0 、ガス定数 R 、活性化エネルギー Q から次式で計算できる。

$$D = D_0 \exp(-Q/RT) \dots (2)$$

ここでまず、脱ボロン処理後のボロン濃度分布の実測値と、拡散支配機構の(1)式による計算値を比較してみる。Fig. 6はHB鋼について、950°Cで2h処理後のボロン濃度分布の実測値(実線)と、(1)式からの計算値(点線)を比較して示したものである。ただし、この

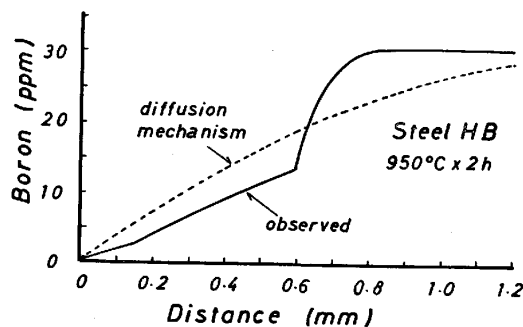


Fig. 6. Comparison of the observed boron profile to the one calculated based on diffusion control mechanism. Diffusion mechanism can not explain the observed profile.

計算には、 γ 中のボロンの拡散に対する値として $D_0 = 2 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}$, $Q = 21\,000 \text{ cal/mol}$ ³⁾を用い、 $C_s = 0$, $C_m = 31 \text{ ppm}$ とした。この比較から、ボロン濃度の実測値は、拡散支配モデルによる計算値とはまったく合わないことが明らかである。

このような折れ曲がりや、Busby³⁾らによる鋼中のボロンの溶解度を測定する実験でも見られたことが報告されており、また本実験においても高ボロンのHB鋼に典型的に観察されること、高温処理の方が折れ曲がり点のボロン濃度が高くなる傾向を示すことから、何らかの点で鋼中のボロンの溶解度と関連していると考えられる。ここで本実験のFig. 3~5で折れ曲がりのはつきり現れるHB鋼について、折れ曲がり点のボロン量(\hat{B})を見ると、950°C加熱では12~15 ppm, 850°C加熱で2~3 ppmとなる。この値を前述のBusbyの溶解度限と比較すると、800~817°Cで6 ppm, 900~930°Cで10~12 ppmの値を報告しており、我々の \hat{B} の値とよく一致しているといつてよい。しかし、950°Cでは彼らは急に大きな30 ppm以上の値を報告しており、この点ではかなり大きなずれがある。一方、HANSENの状態図集⁴⁾のFe-B系で引用されているNICHOLSON⁵⁾のデータでは950°CのBの溶解度は約15 ppmであり、むしろこの値に近いといえる。いずれにしても、この付近のボロンの溶解度はきわめて微量であり、過去のデータのばらつきも大きいことから、本実験での \hat{B} の値は供試鋼でのボロンの溶解度に関連した値を示しているものと考えられ、折れ曲がりや脱ボロン現象が溶解度内の固溶ボロンと、溶解度を越えた析出ボロンの挙動が重畳しているために生じるものと予想される。以下、この点について詳しく考える。

4.2 脱ボロン機構と濃度分布計算モデル

今、全ボロンを溶解度限内の固溶ボロンと溶解度を越えたボロンにわけて考える(Fig. 7)。固溶ボロンは自由に動くことができ、溶解度を越えたボロンは何らかの析出物として固定されていると考える。固溶ボロンは拡散により表面に移動し脱ボロンが起こると考えると、その濃度分布は(1)式の拡散方程式の解で計算でき、模式的に示せばFig. 7の点線①のようになる。この時、溶解度限以上のボロンは固定されてまったく溶け出すことがないとすれば、ボロンの分析値は、固溶ボロン濃度分布(点線①)に析出物となつているボロン量が上積みされることになり、全体の濃度分布は点線②のようになるはずである。

ところが、実測値は図に実線③で示したように、点線②よりも低く、点線①よりも高くなつている。このこと

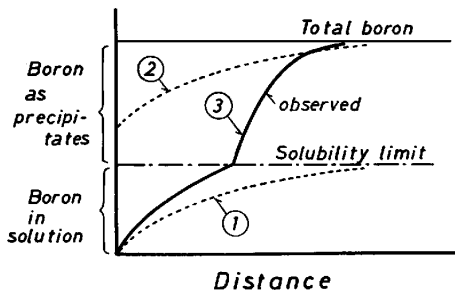


Fig. 7. Schematic comparison of boron profiles of various models. Dotted line ① shows predicted profile of free boron by diffusion mechanism, ② shows predicted profile assuming that no precipitates dissolve. The observed profile falls below ②, which implies boron precipitates dissolve proportionally to the difference between solubility limit and boron in solution.

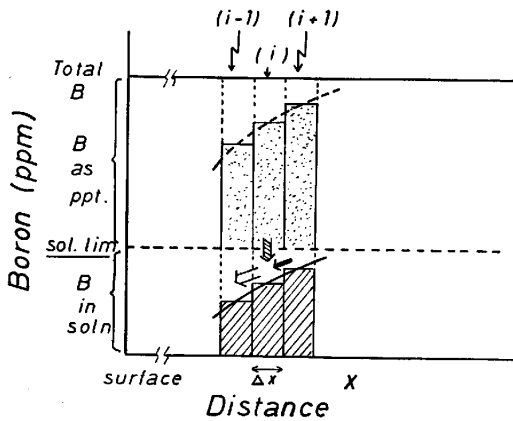


Fig. 8. Calculation model of boron profile using a finite-difference method.

から、固溶ボロンがまず拡散によつて表面から抜け出し、溶解度限内に余裕ができ、この余裕分に応じて析出物が溶け出し固溶ボロンが補充されると考える。

そこで計算モデルとして、Fig. 8 に示すように、処理材の表面から脱ボロンの影響が無視しうるに十分な深さまでの領域をとり、その領域を n 等分した微小区間(コラム)を考える。最表面をコラム(1)とし、途中の i 番目のコラム(i)に着目しその両隣($i-1$), ($i+1$)の間のボロンの流れを考える。まず固溶ボロンについてはその濃度差に応じてコラム(i)から($i-1$)にボロンが流れ出し、逆にコラム($i+1$)から(i)に流入する。この単位時間当たりの流量(J)は拡散係数(D)および濃度勾配に比例するから

$$J = -D \frac{\Delta C}{\Delta x} \dots\dots\dots (3)$$

で示される。ここで ΔC , Δx はそれぞれ隣接コラム間の濃度差および距離である。

一方、析出物から単位時間に補充されるボロン流量

(J_p) は、溶解度限を CL , コラム(i)での固溶ボロン量を C_i とすると、溶解度限の余裕分† ($CL - C_i$) $\times \Delta x$ に比例すると仮定して次式で示す。

$$J_p = k \times (CL - C_i) \times \Delta x \dots\dots\dots (4)$$

ここで k は析出物の溶け出しやすさを示す係数である。

計算にあつては、Fig. 8 に示すように、各コラム間に流れるボロン量の収支から、微小時間 Δt 間の各コラムの濃度変化を順次全領域にわたつて計算を進めて行く差分法を用いて行うことができる。すなわち、コラム(i)の固溶ボロン濃度を C_i , Δt 後のそれを C_i^* とすると、

$$(C_i^* - C_i) \cdot \Delta x = -J_{i \rightarrow (i-1)} \cdot \Delta t + J_{(i+1) \rightarrow i} \cdot \Delta t + J_p \cdot \Delta t \dots\dots\dots (5)$$

で表わせる。一方、析出ボロン濃度 $C_{p,i}$ は Δt 後に $C_{p,i}^*$ となるとすると

$$(C_{p,i}^* - C_{p,i}) \cdot \Delta x = -J_p \cdot \Delta t \dots\dots\dots (6)$$

となり、コラム(i)の全ボロン濃度 $C_{\Sigma,i}^*$ は

$$C_{\Sigma,i}^* = C_i^* + C_{p,i}^* \dots\dots\dots (7)$$

となる。ここで $J_{i \rightarrow (i-1)}$ はコラム(i)から($i-1$)への固溶ボロン流量で、また J_p は析出物からの溶け出しボロン流量で、それぞれ(3)式、(4)式から計算できる。

実際の計算では、最表面コラム(1)での濃度を常に $C_1 = 0$ とし、脱ボロンの影響が十分に無視できる深さまでとつた。また差分法では、時間間隔(Δt)やコラム間隔(Δx)を適切に選ぶことが大切である。以下に示す実際の計算にあつては、時間間隔を $\Delta t = 5s$, コラム間隔を $\Delta x = 0.02mm$ とし、計算領域は表面から $2mm$ までとした。

ここでまず、(4)式の k の値を決定する必要がある。この係数は析出物の溶けやすさに関連したもので、単位時間に溶解度限の余裕分のどのくらいの割合が析出物か

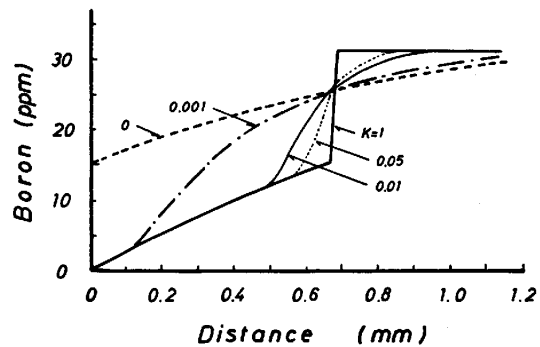


Fig. 9. Variation of calculated profiles with dissolution coefficient of boron precipitation (K).

† 流量はすべて、単位時間当たり、単位面積を通過するボロン量(重量)を考えているから、余裕ボロン量は濃度(重量%)に各コラムの体積($\Delta x \times 1 \times 1$)を掛けたものとなる。

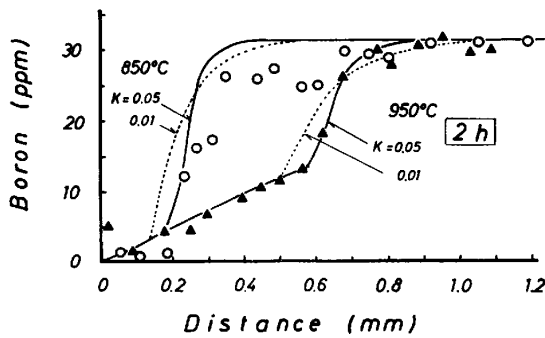


Fig. 10. Comparison of observed data to calculated profile after 2h deboronization. The agreement in 950°C treatment is good, while that in 850°C is rather poor.

ら補充されるかを示す係数であるから、計算時間間隔中に補充される割合は $k \cdot \Delta t$ である。ここで $K = k \cdot \Delta t$ とおき、この K を 1~0 の間で変えたときに予測されるボロン濃度分布の計算結果の例を、HB 鋼を 950°C で 2h 処理したものについて Fig. 9 に示す。K=1 は析出物の存在する間は、溶解度限の余裕分はすぐに析出物から補充される場合であり、K=0 は析出物はまったく溶けず固溶ボロンだけが拡散で移動する場合に相当する。この結果によると、K が小さくなるにつれて折れ曲がり点の位置が表面側に移り、また分布曲線の立ち上がりの形状がなだらかになる傾向が見られる。なお、K=0 は当然前述の Fig. 7 の点線②に対応するものとなる。

Fig. 10 は HB 鋼を 950°C、850°C で 2h 処理したときの計算値を実測値と比較して示したものである。950°C では $K=0.05$ としたときの計算値が実測値と最もよく合っているが、850°C では適合はあまりよくなく、あえていえば立ち上がりの形状などは $K=0.01$ としたときの計算値に近いといえる。850°C で計算が合わない点については後で詳しく検討する。なお、この程度のデータから K の値の大小についての物理的な意味を議論するのはむづかしいが、一応 950°C では計算時間間隔ごとにできた溶解限度の余裕分の 5% 程度が、また 850°C では 1% 程度が析出物から補われると考えられ、950°C の方が溶け出しが大きい傾向を示しているものと思われる。

以上の結果より、まずボロン濃度分布曲線に見られる折れ曲がり現象については、前述の脱ボロン機構とそれに基づいた計算モデルにより説明できると考えられる。しかし、850°C での計算結果が実測値とあまりよく合わないこと、さらに重要なことは、前章の実験結果で指摘したように、850°C の低温処理の方が 950°C の高温処理よりも表面近くでのボロン量がかえって低くなるとい

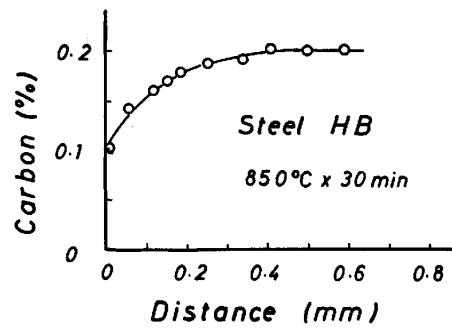


Fig. 11. Carbon concentration profile near surface, after heating in air at 850°C for 30min, which shows decarburization also occurs.

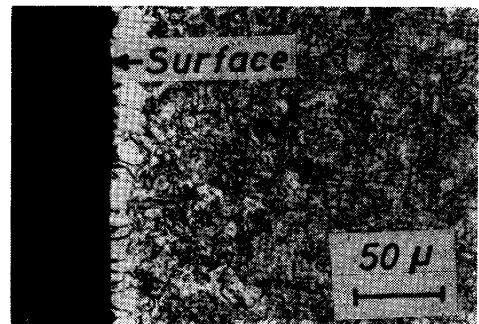


Photo. 1. Ferrite structure formed during austenizing treatment in air at 850°C for 30 min. Specimen is quenched from 850°C into water.

う逆転現象が見られる点についてはこのモデルでは説明できない。そこでこの点について考える。

4.3 表面近傍での脱炭の影響と濃度逆転現象

表面近くでの脱ボロン後のボロン量が、高温と低温で逆転する原因の1つとして、表面近くでの脱炭の影響が考えられる。もし脱ボロン処理中に脱炭が同時に進行すれば、850°C 処理では処理中に表面近くの炭素(C)量が低下して A_3 線を切り、 α/γ 2相域に入りフェライト(α)が生成されることになる。ボロンの拡散係数は α 中では γ 中にくらべてかなり大きいことが知られており、このような場合には表面近くでは脱ボロンが加速されることになる。ちなみに、 α 中のボロンの拡散に対するデータ⁶⁾ ($Q=62\,000$ cal/mol, $D_0=1 \times 10^6$) から 850°C の拡散係数を求めると $D_\alpha=7.8 \times 10^{-7}$ cm²/s となり、同じ温度の γ 中の拡散係数は前述のデータから $D_\gamma=1.6 \times 10^{-7}$ cm²/s であるから α 中の方が約 5 倍大きい。

一方、950°C 処理ではたとえ脱炭が起こっても A_3 線を切ることはなく α が生成されることはない。

Fig. 11 は HB 鋼を 850°C で 30 min アルゴン雰囲気中で加熱したあと急冷したときの表面近くでの炭素濃度を実測した結果であり、Photo. 1 はその表面近くの組織を示す。850°C での A_3 線の炭素量は約 0.15% で

あるから、850°C 30 min でも表面から約 0.05~0.1 mm 程度は 2 相域に入り、写真でもその程度の脱炭層が認められ、この処理中に生成される α 層が逆転現象の原因と考えられる。

そこで、この脱炭の影響も考慮に入れて前述のモデルを修正した計算モデルを考える。差分法の計算はそのまま、まず各コラムごとにボロンの計算に先行して炭素の移動についても同時に計算を行えばよい。計算に当たっては、(3)式の D として炭素の γ 中での拡散係数 ($D_0=0.1$, $Q=32400$ cal/mol¹⁷) を用い、境界条件として表面炭素濃度 (雰囲気ポテンシャル) は Fig. 11 の結果から $C_s=0.1\%$ とした。このようにして計算した各コラムの炭素濃度が A_3 線を切ればボロンの計算に使う拡散係数を γ 中の D_γ から α 中の D_α に置きかえて

まったく同様の計算を行えばよいことになる。

Fig. 12 はこの修正モデルと前節で述べた K の値を使つて計算した結果を 2 h 処理について実測値と比較して示す。前掲の Fig. 10 と比較して、850°C の適合もよく、また表面近くでの逆転現象も実測値とよく合っている。Fig. 13 に 30 min, 1 h 処理について同様の計算結果を示す。

なお、この計算をより厳密に行うためには、2 相域に入った部分で 2 相分離により生成される α 相の厚さを見積る必要がある。さらにまた、この α 相の生成が脱炭そのものを促進するという効果もあり、この点も考慮に入れる必要がある。しかし、これらのことは、本論文の主旨である脱ボロン機構の本質から離れるので、ここでは考慮に入れなかつた。

5. 結 言

ボロン鋼の応用範囲がますます広がると考えられるが、その熱処理時に問題となる脱ボロンについて調べ、比較的低温、短時間の熱処理でも脱ボロンは起こり、雰囲気調整などではその阻止は困難であることを示した。

また、この脱ボロンが起こつた後の表面付近のボロン濃度分布には、途中で濃度分布が不連続に折れ曲がること、および表面近くでは 850°C の低温処理の方が 950°C の高温処理よりもボロン濃度が低くなつてしまうこと、などの単純な拡散支配機構では説明できない特異現象がしばしば認められることを示した。

このような特異現象を説明でき、さらにボロンの濃度分布を予測できる脱ボロン機構として、固溶ボロンの拡散と同時に、析出ボロンから固溶ボロンがその溶解度限の余裕分に応じて補充されること、また処理中に脱炭などでフェライトが生成されると局部的に脱ボロンが加速

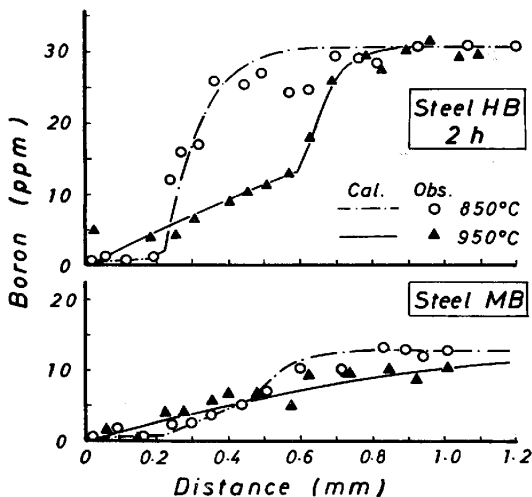


Fig. 12. Comparison of observed data after 2h deboronization to calculated profiles by the modified calculation model taking the effect of decarburization into consideration. Both in 950°C and in 850°C treatments are in good agreement.

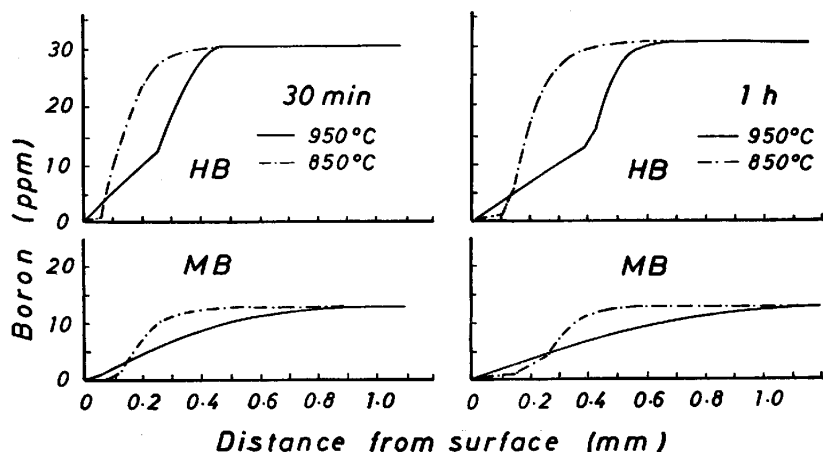


Fig. 13. Examples of calculated boron profiles after 30 min and 1h deboronization treatments.

されることなどを折り込んだモデルを提唱した。

さらに、これらの機構を考慮に入れた差分法の計算方法を検討し、ほぼ満足のできる予測が可能なことを示した。

最後に、ここで示した計算モデルは、脱ボロンだけではなく、処理途中で溶解度限をまたぐ濃度変化が起こる現象や、局部的に異相析出などで別の機構が関与する場合、さらに濃度変化にともなつて拡散係数そのものが変化する場合など、拡散方程式からの解法では不可能か、またはできてもきわめて煩雑であるような計算にもひろく使えるものと考えられる。

文 献

1) *T.G. GIGGES, C.R. IRISH, and N.L. CARWILE:*

J. Research of the National Bureau of Standards, 41 (1948), p. 545

2) *J.C. SHYNE and E.R. MORGAN: Met. Prog., June (1954), p. 88*

3) *P.E. BUSBY, M.E. WARGA, and C. WELLS: Trans. Metall. Soc. AIME, 197 (1953), p. 1463*

4) *M. HANSEN: Constitution of Binary Alloys (1958), p. 249 [McGraw-Hill]*

5) *M.E. NICHOLSON: Trans. Metall. Soc. AIME, 200 (1954), p. 185*

6) *P.E. BUSBY and C. WELLS: Trans. Metall. Soc. AIME, 200 (1954), p. 972*

7) *C. WELLS, W. BATZ, and R.F. MEHL: Trans. Metall. Soc. AIME, 188 (1950), p. 553*