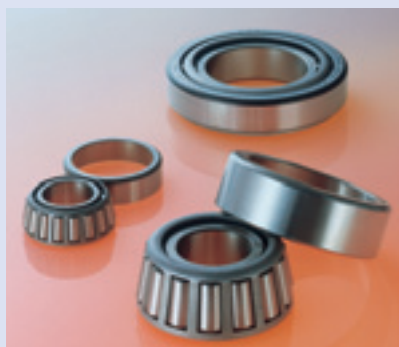


軸受鋼SUJ2の浸炭窒化処理時における雰囲気管理方法 The Atmosphere Control Method for JIS-SUJ2 on Carbonitriding Processes



大木 力* Chikara OHKI

高炭素クロム軸受鋼SUJ2の浸炭窒化処理における窒素侵入メカニズムの研究を行っている。様々な条件での実験とEPMA分析により、窒素侵入に及ぼす炭素の活量、及び、ベースガス組成の影響を明らかにした。その結果、窒素侵入量は、未分解NH₃分圧の増加、炭素の活量の低下、H₂分圧の減少に伴って増加することが分かった。さらに、浸炭窒化処理時の窒素侵入メカニズムが炭素侵入メカニズムと同様であると仮定し、実験結果を基にした鋼中窒素濃度分布の予測方法を構築した。本予測方法で求めた窒素濃度分布は、様々な浸炭窒化処理雰囲気において実測値によく合致する。これにより、SUJ2の浸炭窒化処理時の新しい雰囲気管理技術を確立することができた。

We have been investigating the nitrogen penetration mechanism into bearing steel JIS-SUJ2 on carbonitriding processes. In the course of carbonitriding experiments under various conditions and EPMA analysis, the influences of carbon activity and base gas components on nitrogen penetration behavior were examined. As a result, the nitrogen penetration content of steel increased with the increase of undecomposed NH₃ partial pressure and with the decrease of carbon activity, and H₂ partial pressure.

Besides, assuming that the penetration mechanism of nitrogen is same as that of carbon, a calculation method was developed in order to estimate nitrogen concentration distribution profiles. It was confirmed that the nitrogen concentration distribution profiles predicted by our method agreed well with the experiment results under various conditions. Hence, a development of the new atmosphere control method for JIS-SUJ2 carbonitriding processes was achieved.

1. まえがき

鋼の浸炭窒化処理は、疲労強度向上等を目的に一般的に用いられている熱処理方法である。軸受用鋼に対しても古くより多くの適用例があり、特に異物混入潤滑下での軸受寿命向上に効果のある事が確認されている¹⁾。

浸炭処理時の炭素の侵入メカニズムはよく知られている。その一方で、浸炭窒化処理時の窒素侵入メカニズムに関する研究は最近活発になっているが²⁾、軸受鋼のような高炭素鋼に対する処理についての研究は少ない。したがって今回、高炭素クロム軸受鋼SUJ2への浸炭窒化処理実験を系統立てて行い、窒素侵入メカニズムを明確にすることを試みた^{3), 4)}。その結果、SUJ2への浸炭窒化処理時における窒素侵入挙動に及ぼす炭素の活量及びベースガス成分分圧の影響につい

て明らかにすることができた。また、窒素侵入のメカニズムが炭素侵入と同じであると仮定し、実験結果を基にした窒素濃度分布の予測方法を構築した。

2. 実験方法

2.1 実験炉と雰囲気測定方法

本研究の実験には、バッチ型熱処理炉（容積120L）を用いた。浸炭窒化処理時の雰囲気管理は、表1に示した各分析計により行った。図1に炉本体の模式図、図2にベースガス供給設備を示した。

表1 雰囲気測定に用いた分析計一覧
The analyzer for the atmosphere measurement

分析計名称	測定対象	測定
赤外線式ガス濃度測定装置	CO/CO ₂ 体積分率	非分散型赤外吸収法
鏡面冷却式露点計	H ₂ O体積分率	光学露点測定法
ジルコニアセンサ	O ₂ 体積分率	ジルコニア酸素分圧計
熱伝導ガス分析計	H ₂ 体積分率	熱伝導式
ガスクロマトグラフィ	未分解NH ₃ 体積分率	熱伝導度検出器(キャリア:ヘリウム)

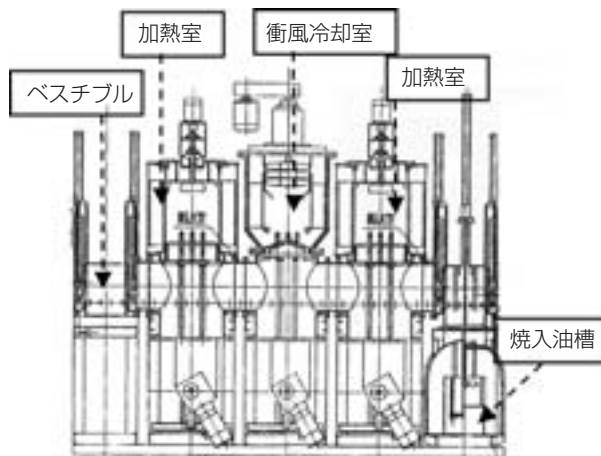


図1 実験炉本体
The furnace for heat treatment



図2 ベースガス供給設備
(A: 純ガスボンベからの供給, 5B: マスフローコントローラ, C: ガスの混合部位)
The feeder of base gas

2.2 供試材と試験片内部の窒素濃度測定方法

供試材には全て同一ロットの高炭素クロム軸受鋼SUJ2を用い、表2にその化学成分を示す。試験片形状は、φ38×φ30×t10のリングとした。

窒素濃度分布は、炉内の中央に配置した試験片を測定対象とし、EPMAの線分析(スポット径2μm, 測定間隔2μm)によって実施した。図3の概略図に示すように、浸炭窒化処理後(焼入後)の試験片を切断し、その切断面の外径側幅中央から内径側に向かって測定した。

単位面積当たりの窒素侵入量は、EPMA分析で得られた窒素濃度分布を窒素濃度がなくなるまで深さ方向に積算し(図4参照)、母材の比重を7.85×10⁻³g/mm³として重量に換算した。

表2 化学成分(wt%)
Chemical compositions of JIS-SUJ2 used (wt%)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu
0.99	0.26	0.44	0.012	0.006	0.08	1.46	0.03	0.15

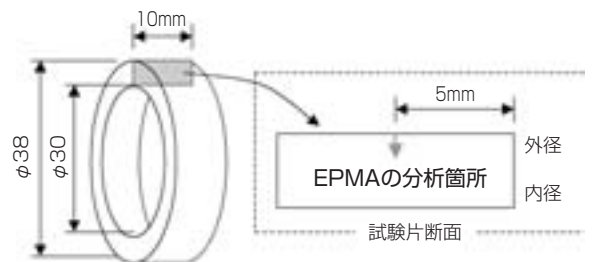
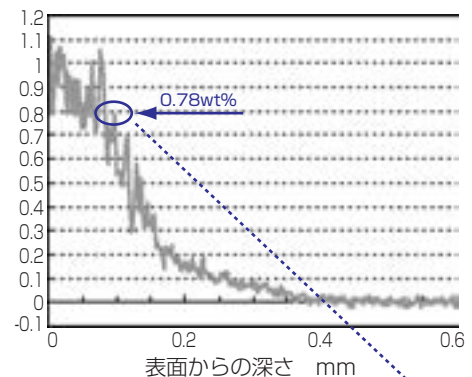


図3 EPMA分析方法
Dimensions of test specimen and scanning position

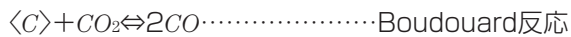


$$\text{窒素侵入量(g/mm}^2\text{)} = \dots + 7.85 \times 10^{-3} \text{ (g/mm}^3\text{)} \times 0.002 \text{ (mm)} \times 0.78 \text{ (wt}\% \text{)} \div 100 + \dots$$

図4 窒素侵入量の定義
The definition of nitrogen penetration content

2.3 炭素の活量の定義

浸炭窒化処理時の雰囲気の重要な要素として、炭素侵入速度を決定する炭素の活量がある。本研究での炭素の活量の計算には、Boudouard反応を用いることにし、その平衡反応式を式(1)、(2)、(3)に示す。



$$a_c = \frac{P_{CO}^2}{K_1 \cdot P_{CO_2}} \dots\dots\dots (1)$$

$$K_1 = \exp\left(\frac{-\Delta G_T^0}{RT}\right) \dots\dots\dots (2)$$

$$\Delta G_T^0 = 172500 - 175.6 \cdot T \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 a_c ：炭素の活量、 K_1 ：平衡定数、 R ：ガス定数(8.31441J/(mol・K))、 T ：絶対温度(K)、 ΔG_T^0 ：標準生成自由エネルギー⁵⁾、 P_{CO} 、 P_{CO_2} はそれぞれCO、CO₂の分圧(atm)である。

活量の定義上、 $a_c > 1$ となることは有り得ない。しかし式(1)で表されるように、ある雰囲気では計算上 a_c の値として1より大きくなる雰囲気での浸炭窒化処理も実施可能である⁶⁾。本研究ではその影響も調査するため、式(1)を式(1')のように定義しなおし、これを実験のパラメータとして使用することにした。

$$a_c^* = \frac{P_{CO}^2}{K_1 \cdot P_{CO_2}} \dots\dots\dots (1')$$

ここで、 $a_c^* \leq 1$ のとき、 $a_c^* = a_c$ (炭素の活量)、 $a_c^* > 1$ のとき、 a_c^* は式(1')で表される変数である。

2.4 実験条件

2.4.1 浸炭窒化処理に及ぼす未分解NH₃分圧、炭素の活量の影響

この実験では全ての条件において、加熱温度を850℃、炉内圧力を1.03atm(1atm=1.013×10⁵Pa)と一定にし、試験片の総表面積も一定にした。ここで変更する実験条件は、炭素の活量 a_c^* 、浸炭窒化処理時間、ベースガス流量、未分解NH₃分圧の4項目である。 a_c^* は0.78~1.08までの6水準、浸炭窒化処理時間は1800~18000sまでの4水準、ベースガス流量は6~20L/minまでの4水準、未分解NH₃分圧は0.36~3.4×10⁻³atmまでの範囲で様々な設定した。なお、この実験で用いたベースガスは、図2に示したベースガス供給設備を使用せず、プロパンガスを原料とした一般的な吸熱型変成ガスを用いた。

2.4.2 浸炭窒化処理に及ぼすベースガス成分分圧の影響

この実験ではすべての条件において、加熱温度を850℃、炉内圧力を1.03atm、処理時間を9000sと一定にし、試験片の総表面積も一定にした。

本実験に用いた各ベースガス成分の流量、未分解NH₃分圧を表3に示した。H₂ガス流量は1.15~6.9L/min、N₂ガス流量は0~9.2L/min、COガス流量は1.15~4.6L/minの範囲で様々な設定し、それぞれの実験条件において、混合ガス流量として合計11.5L/minになるように調整した。この調整は、図2に示したベースガス供給設備にて行っている。未分解NH₃分圧は0.0010、0.0021atmの2水準とした。

表3 浸炭窒化処理に及ぼすベースガス成分の影響調査
実験条件
Conditions for experiments to investigate the influence of
base gas components

未分解NH ₃ 体積分圧 (atm)	H ₂ 流量 (L/min) 注1)	N ₂ 流量 (L/min) 注1)	CO流量 (L/min) 注1)	計 (L/min) 注1)
0.0010	6.9	3.45	1.15	11.5
0.0010	6.9	2.30	2.3	11.5
0.0021	6.9	2.30	2.3	11.5
0.0010	6.9	0	4.6	11.5
0.0021	6.9	0	4.6	11.5
0.0010	1.15	9.2	1.15	11.5
0.0021	1.15	9.2	1.15	11.5
0.0010	1.15	8.05	2.3	11.5
0.0021	1.15	8.05	2.3	11.5
0.0010	1.15	5.75	4.6	11.5
0.0021	1.15	5.75	4.6	11.5
0.0010	3.45	5.75	2.3	11.5
0.0021	3.45	5.75	2.3	11.5
0.0010	3.45	6.9	1.15	11.5
0.0021	3.45	6.9	1.15	11.5
0.0010	3.45	3.45	4.6	11.5
0.0021	3.45	3.45	4.6	11.5

注1) 常温、常圧換算

3. 実験結果

窒素濃度の実測データは、析出物の影響や測定誤差等により不連続であり信頼性は低いため、大枠の傾向把握に用いることは不適切であると考えられる。そこで、窒素侵入量を用いて実験結果を整理した。これにより、析出物の影響、及び、測定誤差は平均化され、誤差を減少させることができる。

3.1 窒素侵入量に及ぼすNH₃の影響

NH₃添加流量と窒素侵入量の関係に及ぼすベースガス流量の影響を明らかにするため、 a_c^* を1.03、浸炭窒化処理時間を9000sと一定にした実験の窒素侵入量を整理した。縦軸を窒素侵入量とし、横軸をNH₃添

加流量、NH₃添加比率(=NH₃添加流量÷ベースガス流量×100)、未分解NH₃分圧に変更して整理した実験結果を図5~7に示す。炉内雰囲気気の単位時間当りの置換回数(=ベースガス流量÷炉の容積)によらず、未分解NH₃分圧と窒素侵入量の関係には、高い相関関係の見られることが分かった。

浸炭窒化処理時間と未分解NH₃分圧、窒素侵入量の関係を図8に示す。図8の曲面は、実測値を近似したものであり、黒点のプロットが実測値である。各処理時間において、未分解NH₃分圧が0.002atm以上の時に、窒素侵入量はほぼ最大を示すこと、その最大値は処理時間とともに増大する傾向があることが確認された。

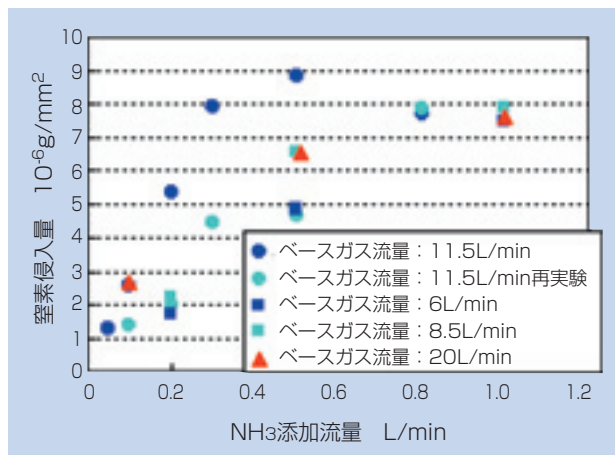


図5 NH₃添加流量と窒素侵入量の関係
Relationship between the flow rate of NH₃ and nitrogen penetration content

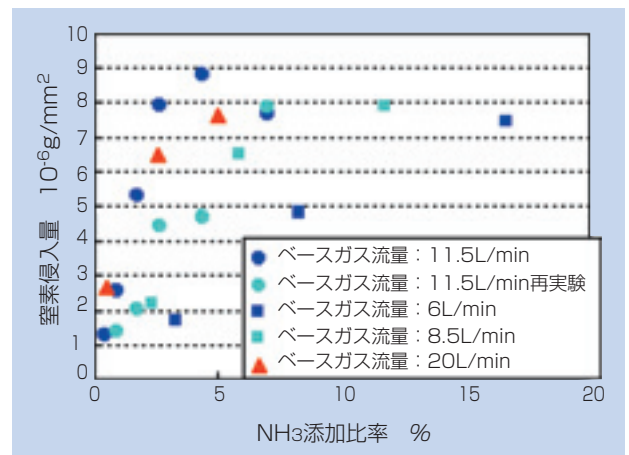


図6 NH₃添加比率と窒素侵入量の関係
Relationship between the addition ratio of NH₃ and nitrogen penetration content

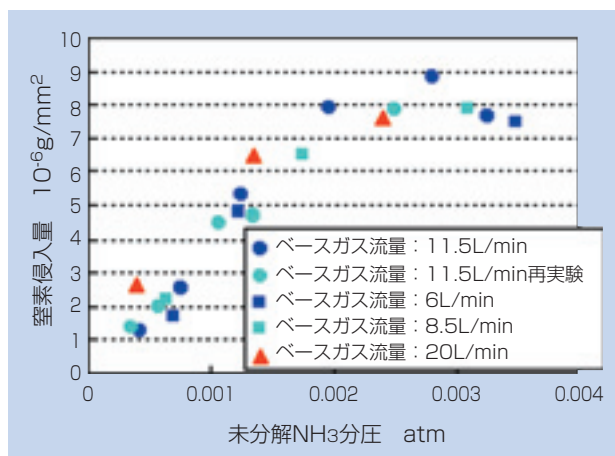


図7 未分解NH₃分圧と窒素侵入量の関係
Relationship between partial pressure of undecomposed NH₃ and nitrogen penetration content

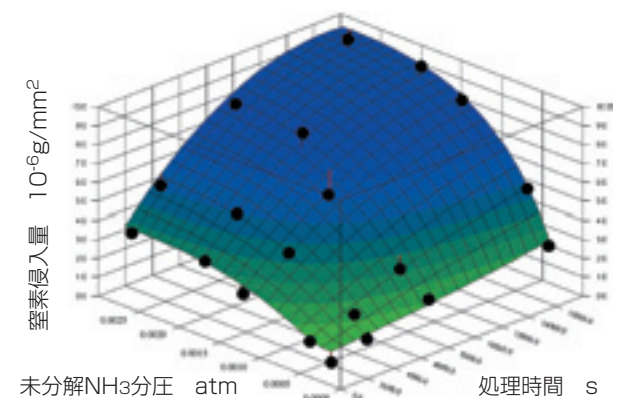


図8 浸炭窒化処理時間と未分解NH₃分圧、窒素侵入量の関係
Relationship among duration times and undecomposed NH₃ and nitrogen penetration content

3.2 窒素侵入量に及ぼす炭素の活量の影響

窒素侵入量に及ぼす炭素の活量の影響を明らかにするため、処理時間9000s、ベースガス流量11.5L/minの一定にして、 a_c^* を変更した実験結果を図9に示す。同一の未分解NH₃分圧において a_c^* が小さい程、窒素侵入量の多くなる傾向が明らかになった。

また、今回の実験範囲内では未分解NH₃分圧0.002 atm以上の時、すべての a_c^* で表面窒素濃度は飽和値を示した。図10に炭素の活量と表面窒素濃度の飽和値の関係を示す。 a_c^* が0.89~1.08の範囲では、表面窒素濃度の飽和値は式(4)で線形近似可能であった。

$$[A_{SN}] = -1.0549 \cdot a_c^* + 1.8771 \dots \dots \dots (4)$$

ここで、 A_{SN} ：表面窒素濃度の飽和値(wt%)である。

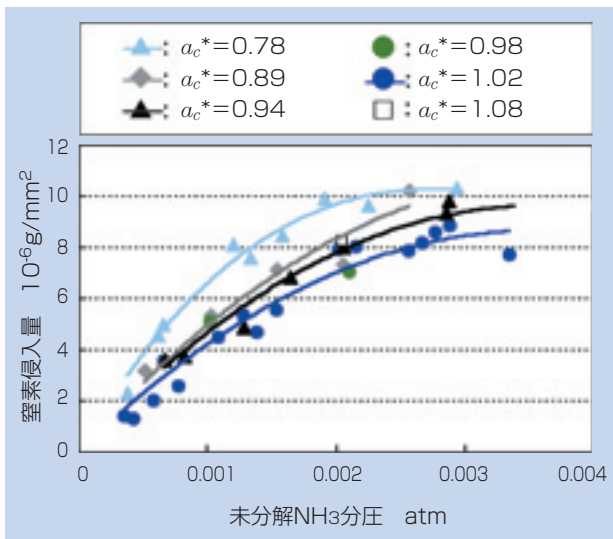


図9 未分解NH₃分圧と窒素侵入量、及び炭素の活量の関係
Relationship among undecomposed NH₃ and nitrogen penetration content, and carbon activity a_c^*

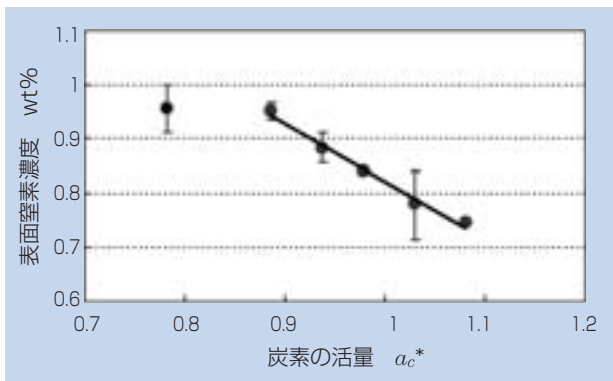


図10 炭素の活量と表面窒素濃度の飽和値の関係
Relationship between carbon activity a_c^* and the surface nitrogen concentration

3.3 窒素侵入量に及ぼすベースガス成分分圧の影響

表3の実験によって得られた窒素侵入量を目的変数とし、CO、N₂、未分解NH₃、H₂の各分圧を説明変数として、重回帰分析を行った。その結果、CO分圧、N₂分圧は窒素侵入量に大きな影響を与えず、未分解NH₃分圧、H₂分圧の2者によって決まることが分かった(1%有意、自由度二重調整寄与率0.953)。

図11にH₂分圧、未分解NH₃分圧、及び窒素侵入量の関係を示す。実験結果のプロット間は曲面近似によって視覚的に捉え易い様になっている。図11より、未分解NH₃分圧の増加、H₂分圧の減少に伴って、窒素侵入量の増加する傾向が明らかになった。

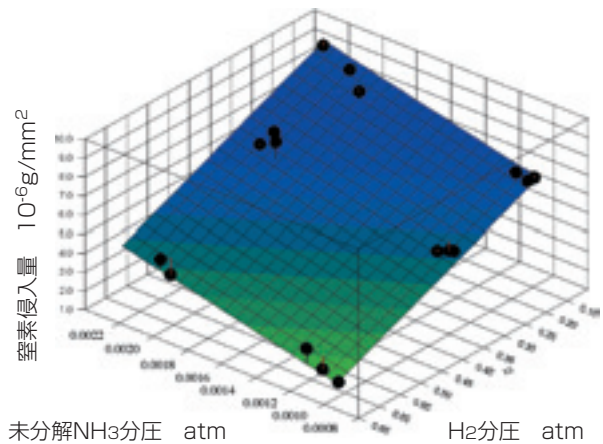


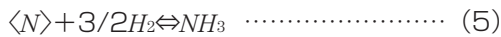
図11 H₂分圧、未分解NH₃分圧、と窒素侵入量の関係
Relationship among partial pressures of undecomposed NH₃ and H₂, and nitrogen penetration content

4. 窒素侵入メカニズムと窒素濃度分布予測

以上の実験結果から、高炭素クロム軸受鋼JIS-SUJ2への浸炭窒化処理時における窒素侵入には①炉内の未分解NH₃分圧、②雰囲気中の a_c^* (炭素の活量)、③炉内のH₂分圧の3つの要素が重要であることが明らかになった。以下では、これらの実験事実を基にした窒素侵入メカニズムと窒素濃度分布の予測方法について述べる。

4.1 窒素侵入メカニズムの仮定

SUJ2の浸炭窒化処理時における窒素侵入メカニズムは式(5)で表される平衡反応で進行すると仮定する。式(5)の平衡定数 K_x を表す式は式(6)となる。



$$a_N^* = \frac{P_{NH_3}}{K_X \cdot P_{H_2}^{\frac{3}{2}}} \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 a_N^* ：雰囲気ガスと鋼の平衡における「窒素の活量に相当する未知数」、分圧の単位はatmである。ここでは式(6)中の平衡定数 K_X は未知数のままとする。

浸炭処理の場合、カーボンポテンシャル、浸炭時間、処理温度が同一であっても、雰囲気成分の違いによって浸炭深さが異なる⁷⁾。この原因をNeumann⁷⁾らは、炭素移行係数 β を用いた炭素侵入速度式(式(7))によって表している。

$$q = \beta (C_G - C_s) \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここで、 q ：炭素侵入速度 (g/mm²s)、 β ：炭素移行係数 (g/mm²s)、 C_G ：最終的に到達し得る炭素濃度 (重量比率)、 C_s ：被処理材の最表面の炭素濃度 (重量比率) である。

C_G はカーボンポテンシャルに相当するため、炭素の活量 a_c と炭素の固溶限濃度 A_s の積で表される。従って、式(7)は式(7')になる。

$$q = \beta (a_c \cdot A_s - C_s) \quad \dots\dots\dots (7')$$

窒素の侵入速度は、侵入メカニズムを炭素と同様に仮定すれば式(7)を参考にして、式(8)のように表される。

$$q_N = \beta_N (N_G - N_s) \quad \dots\dots\dots (8)$$

q_N ：窒素侵入速度 (g/mm²s)、 β_N ：窒素移行係数 (g/mm²s)、 N_G ：最終的に到達し得る窒素濃度 (重量比率)、 N_s ：被処理材の最表面の窒素濃度 (重量比率)

ここで、式(8)中の N_G を $a_N^* \cdot A_{SN}$ とおき、式(8')として表す。

$$q_N = \beta_N (a_N^* \cdot A_{SN} - N_s) \quad \dots\dots\dots (8')$$

A_{SN} ：窒素濃度の飽和値 (重量比率)

式(6)を式(8')に代入すれば、窒素侵入速度は式(9)で表される。

$$q_N = \beta_N \left(\frac{P_{NH_3}}{K_X \cdot P_{H_2}^{\frac{3}{2}}} \cdot A_{SN} - N_s \right) \quad \dots\dots\dots (9)$$

式(9)において、浸炭窒化処理時の雰囲気測定で調査可能な変数はNH₃分圧とH₂分圧であり、被処理材内部の窒素濃度分布の実測値より N_s が求まるため(β_N , K_X , A_{SN} と拡散係数 D により、計算で求めることも可能)、式(9)中の未知数は、 β_N , K_X , A_{SN} の3つである。

4.2 鋼内部の窒素濃度分布に関する仮定

窒素濃度分布形状も炭素の場合と同様に、ガウスのエラー関数に従うものとすれば、それは式(10)で表される。

$$N = N_s \cdot \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left(\frac{X}{2\sqrt{D \cdot t}} \right) \right\} \quad \dots\dots\dots (10)$$

ここで、 N ：位置 X における窒素濃度 (重量比率)、 N_s ：被処理材の最表面の窒素濃度 (重量比率)、 X ：被処理材の表面からの距離 (mm)、 D ：拡散係数 (mm²/s)、 t ：処理時間 (s) である。式(10)における未知数は拡散係数 D であるが、拡散係数は窒素濃度依存性を有する。温度一定の下での拡散係数は式(11)の形状で近似されると仮定する。

$$D = A \exp(B \cdot N) \quad \dots\dots\dots (11)$$

ここで、 A , B ：未知数、 N ：窒素濃度 (重量比率) である。

式(10)を深さ方向に積分した値に被処理材の比重を乗じた値は、処理時間 t における窒素侵入量である。また、式(9)を処理時間 (s) で積分した値も窒素侵入量であるから、式(9)、(10)より式(12)が成り立つ。

$$\int_0^t q_N dt = Q = \rho \int_0^{\delta} N dx = \rho \int_0^{\delta} N_s \cdot \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left(\frac{X}{2\sqrt{D \cdot t}} \right) \right\} dx \quad \dots\dots\dots (12)$$

ここで、 Q ：処理時間 t (s) における窒素侵入量 (g/mm²)、 ρ ：鉄の比重 (7.85 × 10⁻³ g/mm³)

δ ：窒素濃度が事実上なくなる深さ (mm) である。従って、 β , K_X , A_{SN} と、 A , B の全未知数を実験結果から求めることができれば、以上の仮定に基づく窒素濃度分布の予測が可能になる。

4.3 実験結果からの未知数の算出

4.3.1 β の算出

多段階反応の炭素侵入とは違って、鋼への窒素侵入に寄与する反応式は式(5)のみであると考えられる。

また、実験結果によれば窒素侵入量はCO分圧の影響を受けず、N₂分圧の影響も小さい。本研究では、窒素の移行係数 β_N は一定であると仮定した。

未分解NH₃分圧、H₂分圧、及び、 a_c^* が等しい条件下では、式(9)中の $\frac{P_{NH_3}}{K_X \cdot P_{H_2}^{\frac{3}{2}}} \cdot A_{SN}$ は一定値となるため、窒素濃度分布の実測値から、窒素侵入速度 q_N (g/mm²s)、表面窒素濃度 N_s (重量比率) を求めることにより、 β_N を算出することが可能である。

4.3.2 A_{SN} の算出

窒素の侵入速度を表す式(8')において、窒素濃度の飽和値 A_{SN} は母地の濃度として定義すべきであるが、実際には正確に母地の窒素濃度を抽出することはできない。従って、「析出物と母地を含めた窒素の平均的な濃度」として表面窒素濃度を考える。

図10に示した実験結果によれば、雰囲気中の a_c^* と表面窒素濃度の飽和値は、 $0.9 < a_c^* < 1.1$ の範囲では、と窒素濃度の飽和値は直線関係にある。これを利用して窒素濃度の飽和値 A_{SN} を決定する。

4.3.3 K_X, A, B の算出

未知数 K_X は、窒素移行係数 β_N 、窒素濃度の飽和値 a_c^* 、及び、窒素濃度分布の実測値から求まる最表面の窒素濃度 N_s を式(9)に代入すれば、算出することができる。

拡散係数は、EPMA分析によって得られた窒素濃度分布の実測値に合致するように式(11)中の未知数 A, B を変更して拡散方程式を数値解析的に解き、試行錯誤により、逆解析的に算出した。

4.3.4 未知数算出のまとめ

実験結果より求めた未知数を表4に一覧として示した。これら未知数を式(9)、(12)に代入すると式(13)になる。この式(13)を用いれば、窒素濃度分布の予測が可能となる。例えば、微小時間差分 Δt を定めておき、 $t_t=0_s$ での表面窒素濃度 N_s は0であることから、式(13)を陽解法的に逐次計算し、表面窒素濃度及び窒素濃度分布を求めていく方法が考えられる。

但し、式(13)での窒素濃度分布予測は、被処理材の表面窒素濃度が飽和値に到達するまでの時間帯において適用可能である。実際の表面窒素濃度には飽和

表4 未知数一覧
Calculated unknown quantities

未知数の種類		
窒素移行係数： β_N		1.7×10^{-7}
窒素濃度の飽和値： A_{SN}		$(1.8771 - 1.0549 \cdot a_c^*) / 100$
平衡定数： K_X		0.006
拡散係数： D	A	6.5×10^{-7}
	B	149

$$\int_0^{t_t} 1.7 \times 10^{-7} \cdot \left(\frac{P_{NH_3}}{0.006 \cdot P_{H_2}^{\frac{3}{2}}} \cdot \frac{(1.8771 - 1.0549 \cdot a_c^*)}{100} - N_s \right) dt = \rho \int_0^{\infty} N_s \cdot \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left(\frac{X}{2\sqrt{6.5 \times 10^{-7} \exp(149 \cdot N) \cdot t_t}} \right) \right\} dx \dots (13)$$

値があり、それ以降、表面窒素濃度はほぼ上昇しない。従って、被処理材最表面の窒素濃度が飽和値に達した段階で表面窒素濃度を一定とし、それ以降は数値計算によって拡散方程式を解くことにより窒素濃度分布を予測する必要がある。

4.4 窒素濃度分布の予測値と実験値の比較による検証

実験によって得られた実測値と窒素濃度分布の予測値を比較することで、ここで述べた窒素侵入メカニズム及び濃度分布予測方法の確からしさについて検証した。この検証には、表5に示した実験条件での実験結果を用いた。

図12に窒素濃度分布の実測値と予測値を示す。未分解NH₃分圧、炭素の活量 a_c^* 、H₂分圧、処理時間が違っても、窒素濃度分布の予測値は、実測値とよく合致することが分かった。従って、本報の窒素侵入メカニズムの仮定と求めた未知数は、実用的であると考えられる。

表5 予測値と実験値の比較のための実験条件
Experimental conditions

実験条件	ガス成分分圧(atm)注1)		a_c^*	処理時間(s)
	未分解NH ₃	H ₂		
1)	0.0016	0.354	1.03	9000
2)	0.0020	0.622	0.97	9000
3)	0.0016	0.356	0.94	9000
4)	0.0010	0.332	0.88	4500

注1) 常温、常圧換算

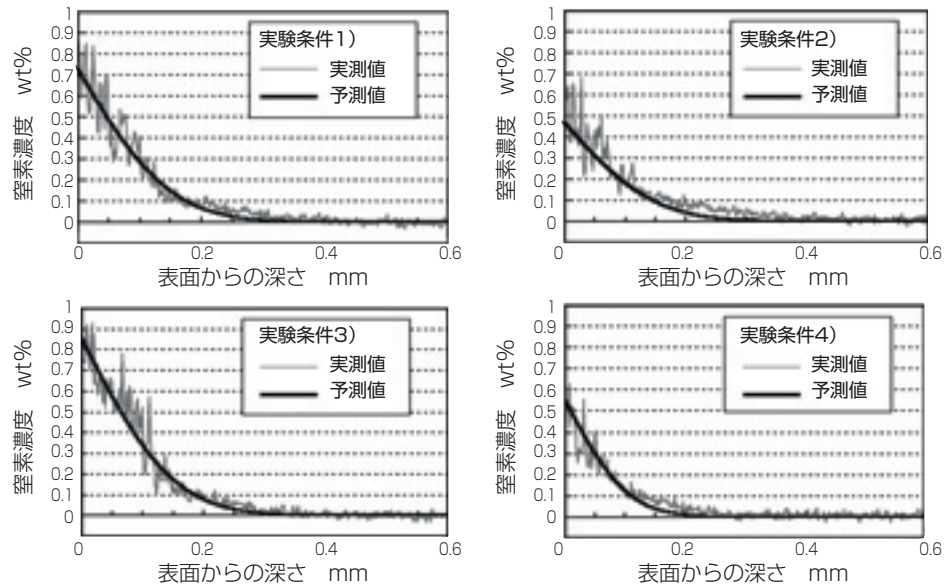


図12 窒素濃度分布の予測値と実験値の比較
Nitrogen concentration distribution profile of experimental numbers ^{1)~4)}

5. まとめ

高炭素クロム軸受鋼SUJ2への浸炭窒化処理実験を系統的に行い、窒素侵入メカニズムを明確にすることを試みた。また、窒素侵入のメカニズムが炭素侵入と同じであると想定し、実験結果を基にした窒素濃度分布の予測方法を構築した。その結果を以下にまとめる。

- 1) 窒素侵入量は、未分解NH₃分圧の上昇に伴って増加する。
- 2) 窒素侵入量は、炭素の活量 a_c^* 、H₂分圧の低下に伴って増加する。
- 3) 未分解NH₃分圧、炭素の活量 a_c^* 、H₂分圧、及び窒素濃度依存性のある拡散係数を考慮した鋼中窒素濃度分布の予測方法を構築した。
- 4) 様々な浸炭窒化処理雰囲気において、本予測方法で求めた鋼中窒素濃度分布がEPMA分析で得られた実測値に合致することを確認した。

参考文献

- 1) 例えば, N.Tsushima : SAE Technical paperseries, (1986), 860725
- 2) 成田匠吾, 横瀬敬二 : “浸炭窒化した各種肌焼鋼の表面窒素濃度に及ぼす窒化ポテンシャルの影響,” 日本熱処理技術協会第61回講演大会予稿集 (2005), 5

- 3) 大木力, 川北雅之 : “高炭素鋼への浸炭窒化処理に及ぼす炭素の活量の影響,” 日本熱処理技術協会第62回講演大会予稿集 (2006), 5
- 4) 大木力, 川北雅之 : “高炭素鋼への浸炭窒化処理に及ぼすベースガス分圧の影響,” 日本熱処理技術協会第62回講演大会予稿集 (2006), 17
- 5) 化学工学協会編 : 化学工学便覧, 丸善 (1950) 64
- 6) R.Collin, S.Gunnarson, and D.Thulin : “Influence of Reaction Rate on Gas Carburizing of Steel in a CO-H₂-CO₂-H₂O-CH₄-N₂ Atmosphere,” Journal of The Iron and Steel Institute, (1972), 777
- 7) F. Neumann and U.Wyss : “Thermodynamische Grundlagen zum indirekten Messen des C-Pegels,” H.T.M., vol.49, No.4, (1994) 255

執筆者近影



大木 力
要素技術研究所