プロパンを用いて真空浸炭を行った低炭素鋼の 表面炭素濃度と処理条件の関係†

石 神 逸 男* 横 山 雄二郎** 三 浦 健 一**
浦 谷 文 博** 星 野 英 光**

Relationship between Treating Conditions and Surface Carbon Concentration of Low Carbon Steel Vacuum-Carburized with Propane

by

Itsuo ISHIGAMI*, Yujiro YOKOYAMA**, Ken'ichi MIURA**,
Fumihiko URATANI** and Hideaki HOSHINO**

A low carbon steel, S15CK, was carburized at the temperatures of 1113 to 1313K for times up to 20.571ks in a propane atmosphere at 2.67kPa and thereafter diffused below 0.133Pa for times ranging from 0 to 18.9ks at the same temperature where carburizing was done. Carbon profiles were determined by a succession of grindings and emission spectrochemical analyses of the ground surfaces. The uptake amount of carbon by a thin specimen was measured by infrared absorptiometric method after combustion in the current of oxygen. Carbon flux was evaluated from dependence of the amount on carburizing time. A mathematical model is proposed to describe carburizing behaviors. Comparison between the calculated and the experimental profiles revealed that the model was able to represent the carburizing behaviors precisely. Both experimental and calculated results verified that treatments at the same ratio of carburizing time to diffusing time give the same surface concentration of carbon. This fact is very useful to find out the optimum condition in vacuum carburizing.

Key words: Vacuum carburizing, Propane, Carbon content profile, Emission spectrochemical analysis, Surface concentration of carbon, Carbon flux, Uptake amount of carbon

1 緒 言

真空加熱された炉内にメタンやプロパンなどを直接導入して浸炭を行う真空浸炭法は変成炉を必要としない、迅速浸炭が可能である、粒界酸化を生じないなど、従来のガス浸炭法にくらべて多くの優位点を有している。当初この技術は画期的な浸炭プロセスとして注目を集めたにもかかわらず、つい最近まで期待されたほどの普及は見られなかった。それにはいくつかの原因が考えられるが、一つにはその制御性の低さがあげられる。しかし近年の環境問題や資源問題に対する関心の高まりを背景として、大気汚染防止や省エネルギー・省資源にきわめて有効な技術として急速に見直されつつある。

これまでに、メタンを用いた真空浸炭において、その浸炭挙動を明らかにしたうえで¹⁾、浸炭挙動を忠実に表す数式モデルを提案するとともに、的確なデータを与えれば、その解析精度はかなり高いことを実証した。²⁾ またプロパンを用いた場合には炭素が雰囲気から鋼中へ流入する速度（以下、炭素流入速度と呼ぶ）が非常に大きく、そのような状況下においては、表面炭素濃度ならびに有効浸炭深さと浸炭時間および拡散時間との間にはいくつかの規則性があることを解析結果の整理・検討から見い

だした。³⁾ 本研究では表面炭素濃度に関する規則性を実験的に検証することを目的としている。

2 実験方法

2・1 試 片

試片には市販の炭素肌焼鋼 S15CK を用いた。その化学組成を Table I に示す。直径 32mm の丸棒を 1173K・3.6ks の真空焼ならし (0.133Pa) を行った後、旋削および平面研削加工によって Fig. 1 の形状とし、表面を 0.3 μ m 粒度のアルミナ剤を用いてバフ研磨仕上げした。厚さ 7.5 および 11.5mm の試片は炭素濃度分布、0.4 ~ 1.5mm の試片は炭素の総流入量および炭素固溶限を求めするために使用した。

2・2 浸炭および拡散処理

装置の概略を Fig. 2 に示す。反応管には内径 35mm、長さ 1m の石英管を用いた。試片を取り付けた後、中間扉を閉じ、加熱室のみを 0.133Pa まで排気してから、

Table I. Chemical composition of steel used (mass%).

C	Si	Mn	P	S
0.175	0.19	0.53	0.008	0.021

† 原稿受理 平成 12 年 1 月 26 日 Received Jan. 26, 2000

* 正 会 員 大阪府立産業技術総合研究所 〒594-1157 和泉市あゆみ野, Technology Research Institute of Osaka Prefecture, Ayumino, Izumi, 594-1157

** 大阪府立産業技術総合研究所 〒594-1157 和泉市あゆみ野, Technology Research Institute of Osaka Prefecture, Ayumino, Izumi, 594-1157

Fig. 1. Geometry and dimension of a specimen used.

Fig. 2. Schematic representation of a vacuum carburizing furnace.

0.333K/s の速度で所定温度まで加熱する。その温度で 0.6ks 間均熱を行った後、炉内にプロパンを直接導入して浸炭を行った。その際、ベネット型真空計の水銀柱部分に取り付けた投受光器と反応生成ガスの排出側に設置した電磁バルブとを連動させることによって浸炭中の炉内圧力を任意の値に保持することができる。

処理は飽和値調整法⁴⁾すなわち、まず浸炭を行い、その後真空加熱することにより表面炭素濃度を調整する方法で行った。浸炭条件はプロパン圧力 2.67kPa、温度 1113 ~ 1313K、時間 0.6 ~ 20.571ks とした。浸炭後の

拡散処理は 0.133Pa 以下で、温度は浸炭温度と同一とし、0 ~ 18.9ks 間行った。一連の処理が終了した後、アルゴンガスによって炉内を大気圧まで復圧し、中間扉を焼入冷却槽底部まで引き下げ、試片を吊り下げたヒューズを溶断することにより、試片を水中へ自然落下させて急冷した。

2・3 炭素濃度分析

炭素濃度分布 ($C-x$ 曲線) は試片表面から順次 20 ~ 100 μ m ずつ平面研削し、そのつどスパーク放電発光分光分析を行うことにより求めた。定量化のための検量線は 0.01 ~ 1.69mass% の炭素濃度を有する 10 種類の炭素鋼および低合金鋼から作成した。この検量線を用いて同じ鋼種の熱処理状態を種々変えた試片で求めた分析値は同一試片の繰り返し分析の精度に近く、浸炭層内の組織変化による分析誤差は生じないものと判断できた。⁵⁾

2・4 炭素流入量

次節で述べるように、数値解析に不可欠なデータの一つに浸炭反応が鋼中の炭素拡散によって支配される段階よりも前の段階での炭素流入速度 F があげられる。それは試片中に流入する総炭素量 M の経時変化、すなわち、浸炭時間を t_c とするとき、 $F = (\partial M / \partial t_c)$ から決定できる。炭素流入量 M は炭素濃度分布を試片表面から深さ方向に積分しても得られ、浸炭ガスとしてメタンを用いるときには炭素拡散支配に移行するまでの段階が長いいため、この方法が採用できる。^{1), 2)} しかしながらプロパンを用いたときにはその段階が非常に短く、分析 $C-x$ 曲線における十分なプロット数が得にくく、上記の方法では M の測定精度がかなり低くなることがわかった。

そこで薄板試片に対して浸炭を施し、その試片全体を燃焼電量滴定法で分析することによって M を求めた。まず浸炭時間 t_c の長さに応じて種々の厚さ (0.405 ~ 1.513mm) の薄板試片を浸炭し、側面からの浸炭の影響が現れない (平面端部から少なくとも試片厚さ X (mm) だけ離れた) 部分から切り出した短冊試片を燃焼電量滴定法で分析する。その値を C_E (mass%) とするとき、 M (mol/mm²) は次式で与えられる。

$$M = \frac{W_a(C_E - C_0)}{12.011 \times 100} \times \frac{1}{2S} \quad (1)$$

ただし W_a : 分析試片の重量 (g)
 C_0 : 母材炭素濃度 (0.175mass%)
 S : 分析試片の片面面積 (mm²)

ここで、 ρ を試片の密度 (α -Fe (293K) = 7.873×10^{-3} g/mm³) とすると、 $SX\rho = W_a$ だから

$$S = \frac{W_a}{X\rho} \quad (2)$$

したがって、次式が得られる。

$$M = \frac{X\rho(C_E - C_0)}{2 \times 12.011 \times 100} = 3.277 \times 10^{-6} \times X(C_E - C_0) \quad (3)$$

3 浸炭モデル

拡散方程式はフィックの第 2 法則で表される。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial C}{\partial x} \right) \quad (4)$$

ここで C は炭素濃度, t は時間, x は鋼表面からの距離, D は炭素の拡散係数である.

浸炭期において, 式 (4) を解くための初期条件は, C_0 を鋼の母材濃度とするとき

$$t=0 \text{ で, すべての } x \text{ について } C=C_0 \quad (5)$$

境界条件は, 炭素が雰囲気から鋼中へ流入する速度を F とするとき, 表面炭素濃度が固溶限 C_{sat} に達する以前および以降の段階でそれぞれ次式 (6) および (7) で与えられる.

$$-D \frac{\partial C}{\partial x} = F, \quad x=0 \quad (6)$$

$$C=C_{sat}, \quad x=0 \quad (7)$$

一方, 浸炭後の拡散期において, 拡散方程式は浸炭期と同じく式 (4) である. その初期条件は浸炭期終了時の濃度分布で与えられ, また境界条件も式 (6) で表されるが, 拡散は真空下の加熱によって行われるため, 炭素の出入りがなく $F=0$ だから, 次のようになる.

$$\frac{\partial C}{\partial x} = 0 \quad (6a)$$

なお精度の高い解析を行うには炭素拡散係数の濃度依存性を考慮することが不可欠であるが,¹⁾ それには C. Wells らが鉄-炭素系で求めたデータ⁶⁾ を回帰分析することによって得られた次の近似式を用いた.

$$D_0 = (4.725 - 5.374W_C + 1.779W_C^2) \times 10^{-5} \quad (8)$$

$$Q = 154.5 - 21.04W_C - 3.285W_C^2 \quad (9)$$

ここで D_0 は頻度因子 (m^2/s), Q は活性化エネルギー (kJ/mol), W_C は固溶炭素濃度 (mass%) であり, 拡散係数 D は次式で与えられる.

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (10)$$

Fig. 3. Part of the diagram for the Fe-Fe₃C system, showing the A_{cm} line. S15CK plates of X mm in thickness were carburized for t_c ks in C₃H₈ at 2.67kPa.

4 実験結果および考察

4.1 解析に必要なデータの決定

4.1.1 炭素固溶限 C_{sat} 前報では, 浸炭時間を延長しても表面炭素濃度 C_s がもはや上昇しなくなったときの C_s 値を炭素固溶限 C_{sat} とした.^{1), 2)} しかしながら, 4.2.1 項に後述するように, その値を C_{sat} とすることが解析精度を低下させる要因の一つであると思われる.

そこで薄板試片を表層と中心部の EPMA 分析による濃度の差が認められなくなるまで浸炭し, 試片表面に析出した炭などを研削で除去した残りを電量滴定法で分析した値を固溶限とすることにした. その結果を Fig. 3 に示す. 意外なことに, それらの値は田中が数多くの報告を整理検討し, もっとも確からしいものとしてまとめた鉄-炭素系状態図の値⁷⁾ とほとんど一致した.

4.1.2 炭素流入速度 F Fig. 4 に浸炭時間 t_c と炭素流入量 M の関係を示す. 浸炭開始から表面濃度 C_s が C_{sat} に達するまでの間は $(\partial C/\partial x)$ がいくらでも大きくなり得るため, 浸炭初期には必ず鋼中の炭素拡散支配以外の反応過程が存在するはずである. 例えば, メタンを用いたときには浸炭開始から C_s が C_{sat} に達するまでの間に化学反応支配の過程が明瞭に認められ, そこでは M が t_c に比例して増加した.^{1), 2)} その場合, F は $M-t_c$ 曲線の傾きで与えられる. しかしながら, Fig. 4 に示すように, プロパンを用いた場合はそのような段階がほとんど現れず, 浸炭開始後急速に鋼中の炭素拡散支配へと移行していることを示唆している.

ところで, 浸炭反応が鋼中の炭素拡散によって支配されているとき, 拡散係数 D が濃度依存性を示さない場合には, M は t_c の平方根に比例する.⁸⁾ それでは D が濃度

Fig. 4. Changes in total amount of carbon with carburizing time. S15CK was carburized in a propane atmosphere at 2.67kPa. Open marks are rational in determining values of carbon flux through a numerical analysis and solid marks are irrational.

依存性を示すときはどうかと言えば, 確実に拡散支配が予測される F の値として $10^6 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ を用いて M 値を算出し, それらの経時変化を $M = at_c^b$ の式で近似したところ, b の値は 1113 ~ 1193K において 0.495 ~ 0.498 と 0.5 に非常に近い値であった. それらを図中の破線で示すが, 上記の形の近似式は少なくとも実測値 M の経時変化の傾向を表すことは可能であると思われる. そこで $M = at_c^b$ で近似してみたところ図中の実線のようになった. そのときの b 値は 1113K で 0.476, 1153K で 0.396, 1193K で 0.486 であり, 0.5 より明らかに小さいと判断される値も得られた. すなわち, 浸炭のごく初期においては鋼中の炭素拡散支配以外の過程が存在するようである.

そこでプロパンを用いたときの浸炭挙動も, メタンの場合と同様, 表面炭素濃度が固溶限に達するまではある一定の F 値で浸炭が進行し, それ以降は拡散支配に移行するものとして, F 値の推定を試みた. 具体的には, Fig. 4 の各実測値 M と計算値 M が一致するような F 値を試行錯誤的に求めた. ただしその F 値を用いて算出した $C-x$ 曲線において試片中心部の濃度が母材濃度を 0.01mass% 上回ったとき, すなわち 0.185mass% に達したときの F 値は除外した. またいかに大きい F 値を投入しても計算値 M が実測値に達しない不合理な場合もあった. Fig. 4 ではそれらの無効値 M を黒印で示している. それら以外の実測 M 値から推定された F 値を Table II に一括して示す. それによると, 例えば 1193K において, メタンを用いたときの F 値¹⁾ $4.83 \times 10^{-5} \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ (圧力 26.7kPa) および $8.28 \times 10^{-5} \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ (53.3kPa) とくらべると, プロパンでの F 値は圧力が 2.67kPa と非常に低いにもかかわらず, $2.79 \sim 4.60 \times 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ とはるかに大きい. その結果, プロパンによる浸炭では

C_s が C_{sat} に達するまでの過程はメタンの場合より著しく短く, すみやかに鋼中の炭素拡散支配に移行していくと考えられる.

ところで Table II の F 値について温度依存性を調べた結果を Fig. 5 に示す. 同図にはメタンで得られた結果²⁾ も併記したが, その直線の傾きから見かけ上の活性化エネルギーを求めてみると圧力が 26.7, 53.3kPa のときそれぞれ 270, 380kJ/mol であった. 圧力の低い 26.7kPa での値はメタンと鉄の化学反応の活性化エネルギー 230kJ/mol⁹⁾ に近い. しかし 53.3kPa では過剰な値となっているが, これは芳香族ベンゼン環に属する物質を生じるなどの副反応を併発しているためと思われる.¹⁾ いずれにしろメタンを用いた S15CK の浸炭の場合でも, SNCM815 のときと同じく,¹⁾ まず最初は化学反応支配によって浸炭が進行すると考えられる.

一方, プロパンを用いたときの F 値はアレニウス式にはほど遠い傾向を示している. その理由として次の二つが考えられる. (1) F 値の決定精度そのものが低い, (2) 温度域によって反応状況が変化している.

まず (1) について, M 値から F 値を推算するのに用いた解析モデルの精度は, 次項以降に述べるように, 比較的良好と思われる. むしろ浸炭開始から鋼中の炭素拡散支配過程に移行するまでの時間があまりにも短いため, その間の M 値の経時変化が非常に測定しにくく, 誤差が混入しやすいものと思われる.

次に (2) について, J. H. Kaspersma ら¹⁰⁾ はプロパンと窒素の混合ガス中における鉄箔の浸炭速度に関する実験において 1123K と 1198K では反応次数が異なること, また混合ガスの炉内滞留時間が短いときには次式 (11) のような分解が生じていることを分析によって示し, 気相中および気体-固体間の複雑な反応が起こっていることを

Table II. Estimated values of carbon flux.

Temp. T (K)	Time t_c (ks)	Carbon Flux			
		F	$F(\text{Mean})$	Eq.(14)	F_{DC}
		$(10^{-4} \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$			
1113	400	11.80	6.289	5.992	101.08
	600	7.394			
	900	4.251			
	900	3.707			
	1300	4.290			
1153	600	7.376	9.246	10.88	175.54
	600	13.27			
	900	8.082			
	900	8.873			
	1200	8.732			
	1200	9.141			
1193	240	46.00	38.64	18.99	338.66
	240	42.03			
	600	27.89			
1233	610	—	—	31.97	695.65
1273	610	38.98		52.08	1454.8
1313	480	54.03		82.35	2076.6

F is the flux at an earlier stage of carburizing in a propane atmosphere at 2.67 kPa; F_{DC} is the minimum of fluxes which bring about diffusion controlling.

Fig. 5. Temperature dependence of carbon flux. S15CK was carburized.

示唆している。

奥村ら¹¹⁾もプロパンを用いた1203Kにおける真空浸炭で四重極質量分析計による分析結果から、 H_2 発生をともないながら、次のように高級炭化水素から低級炭化水素へと分解する過程を予測している。

(微量で分離不能のため n と表示, $n = 1 \sim 4$)

さらに低温域 (783 ~ 833K) では

のように C_3H_6 も生成するとの報告もある。¹²⁾

以上のことから、プロパンを用いたときの F 値が広い温度範囲でアレニウス則を満たすことは本来不合理なことであり、例えば、Fig. 5 の破線で示したような温度域を区分した考察が必要かもしれない。ただ上記のような問題点があるにしても、解析の汎用性を考えるとき、 F を温度の関数として表しておくことはそれなりに有意義なことである。そこで、式のもつ意味はともかくとして、あえてアレニウス近似を行ったところ次式が得られた。

$$\ln F = 9.784 - 19148/T \quad (14)$$

ここで F および T の単位は $\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ および K である。

式 (14) から算出した値と Table II の値とでもっとも大きく異なるのは 1193K の場合である。そこでそれぞれの F 値を用いて表面炭素濃度が固溶限に達するまでの時間 t_{sat} を求めてみると、式 (14) の F 値 ($1.899 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) では 225s, Table II の平均値 ($3.864 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) では 39s となった。ちなみに他の温度についても t_{sat} を計算したところ、Table III の結果を得た。いずれの方法による F 値を採用しても t_{sat} の値に大差は見られない。また低温ほど t_{sat} が増加する傾向にはあるが、それほど大きな値ではなく、通常の浸炭処理時間を想定するかぎり、浸炭の大部分は表面炭素濃度が固溶限に達した後の鋼中の炭素拡散によって支配されていると考えられる。したがって F 値として Table II の値あるいは式 (14) による推算値のいずれを用いても解析精度には支障がないと判断できる。事実、Fig. 6 に示すように、比較的短い時間の浸炭処理について両者の F 値を用いて計算した C - x 曲線でもほとんど差異が認められなかった。それゆえ、以下の解析では汎用性を考慮して式 (14) から推算した F 値を用いることにする。

4・2 炭素濃度分布に対する解析精度

4・2・1 メタンを用いた結果に対する再考 前報²⁾

で、S15CK に対してメタンを用いて浸炭し、その後の拡散は行わなかったときの炭素濃度分布について、解析と

Table III. t_{sat} in second calculated with the mean of F values in Table II and with ones estimated from eq. (14).

T (K)	1113	1153	1193	1233	1273	1313
F in Table II	385	436	39	—	255	229
F from eq. (14)	429	307	225	172	138	93

Fig. 6. C - x profiles calculated on the assumption that at 1193K, S15CK ($C_0 = 0.175\text{mass}\%$) was carburized in under a propane pressure of 2.67kPa and thereafter diffused under a pressure below 0.133 Pa. t_{sat} is the time required until the surface concentration of carbon reaches the solubility limit of carbon.

Fig. 7. Measured and calculated carbon profiles in S15CK carburized for t_c ks under a methane pressure of 53.3kPa. t_c and t_d are carburizing and diffusing times, respectively.

分析の結果を比較した。その計算値を Fig. 7 の破線で示す。それによると、試片内部では実測値と計算値はよく一致するのに対して、表層部での一致度はあまり良好ではなかった。その理由として、前報では浸炭時間を延長しても表面炭素濃度 C_s がもはや上昇しなくなったときの C_s 値を炭素固溶限 C_{sat} とした。^{1), 2)} しかしながらそれらの値は、浸炭終了後に Ar ガスをバックフィル(backfill) し

て炉内を大気圧まで復圧させてから、ピストンロッドを引き下げて焼入れを行ったときの C_s 値であり、それらの操作には 60s 前後の時間を要するため、その間に炭素が内方向への拡散を起こし、結果として表面炭素濃度は浸炭終了時の濃度よりも低下していることが予想された。そこで、4・1・1 項で求めた炭素固溶限の値を用い、浸炭後に 60s の拡散を生じたものとして解析を行ったところ、Fig. 7 の実線に示すように表層部でも実測値と非常によく一致した。なお Fig. 7 の濃度分布は表面濃度が固溶限には達していない化学反応支配過程でのものであり、試片表面での炭素析出¹³⁾は起こっていないと考えられる。

4・2・2 プロパンを用いた結果に対する解析結果 一例として、Fig. 8 に 1273K で浸炭時間 t_c に対する拡散時間 t_d の比を 3 としたときの炭素濃度分布の実測値と計算値を比較して示す。計算に用いた F 値は式 (14) から求めた $5.209 \times 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ である。計算値と実測値はいずれの場合もよく一致している。なお、同図中には浸炭開始後ただちに鋼中の炭素拡散支配へと移行することが確実視される F 値として $10^6 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ を用いて計算した結果も破線で示したが、浸炭時間が短い場合にはごくわずかな差異が認められるものの、実質的な意味をもたない程度のものである。したがってプロパンを用いた浸炭では浸炭開始後ただちに鋼中の炭素拡散が支配過程となって浸炭が進行したと考えてもよい。

ところで注目すべきは、すべての曲線で C_s がほぼ一致していることである。これらの処理間では浸炭温度が 1273K、浸炭時間と拡散時間の比 (t_d/t_c) が 3 と同一であることが共通している。Fig. 6 の解析結果でも浸炭温度が 1193K、(t_d/t_c) が 1 と同じときには拡散処理後の表面

Fig. 8. Measured and calculated carbon profiles; S15CK was carburized at 1273K under a propane pressure of 2.67kPa and thereafter diffused under a pressure below 0.133Pa.

Fig. 9. Changes in surface carbon content C_s with ratio (t_d/t_c); t_c and t_d are carburizing and diffusing time, respectively; S15CK was carburized in a propane of 2.67kPa and thereafter diffused below 0.133Pa.

濃度が一致している。ただし Fig. 6 と Fig. 8 の表面濃度はそれぞれ 0.80 ~ 0.82, 0.76 ~ 0.77mass% と異なっている。したがって、浸炭と拡散を同一温度で行う場合、次のような規則性が存在することが予想される。すなわち、浸炭時間と拡散時間の比が一定であれば表面炭素濃度は同じ値を示す。

4・3 表面炭素濃度 C_s と浸炭時間 t_c および拡散時間 t_d との関係

ここでは前項で予測した規則性を詳細な実験によって検証する。Fig. 9 に 1113 ~ 1313K で浸炭時間 t_c と拡散時間 t_d の比を変えて処理を行ったときの表面炭素濃度 C_s を (t_d/t_c) との関係として示す。計算値と実測値は非常によく一致しており、浸炭時間と拡散時間の比が一定であれば表面炭素濃度はそれぞれの温度に応じて同じ値を示すことがわかった。なお Fig. 8 にも示唆されているように C_s の分析値には誤差要因が多いため、Fig. 9 の C_s には実測 C - x 曲線において炭素濃度が表面から 0.18 ~ 0.20mass% 付近まで減少する領域を三次式あるいは四次式で近似した曲線の外挿値を用いた。

ところで、本解析モデルではある処理条件を与えたときに C - x 曲線が算出されるという理論の流れになっているが、処理条件の設定という立場から見るとその逆の流れが必要となる。その意味で Fig. 9 に示された規則性はその大きな足がかりとなるものである。

5 結 論

プロパンを用いたときの真空浸炭の挙動を明らかにすることを目的とし、プロパン圧力 2.67kPa、温度 1113 ~ 1313K、時間 0.6 ~ 20.571ks で浸炭を行い、その後 0.133Pa 以下で、浸炭温度と同一温度で 0 ~ 18.9ks 間の拡散を施した。得られた結果は以下の通りである。

- (1) 炭素流入速度はメタンの場合よりはるかに大きい

ため、表面炭素濃度は浸炭開始後 40 ~ 440s で固溶限まで到達し、その後は鋼中の炭素拡散に支配されて浸炭が進行する。

(2) 表面濃度が固溶限に達するまでの段階での炭素流入速度 F として次の近似式が得られた。

$$\ln F(\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}) = 9.784 - 19148/T(\text{K})$$

(3) 上式で求めた F 値を用いて行った炭素濃度分布に関する解析結果は実測値と非常によく一致した。

(4) 数値解析および分析の結果から、浸炭と拡散を同一温度で行う場合、浸炭時間と拡散時間の比が一定であれば表面炭素濃度は同じ値を示すことを明らかにした。

参 考 文 献

- 1) 石神逸男, 辻 新次, 浦谷文博, 綱沢栄二, 日本金属学会誌, **50**, 845 (1986).
- 2) S. Tsuji, I. Ishigami, K. Yamanaka, Trans. JIM, **28**, 48 (1987).
- 3) 石神逸男, 辻 新次, 浦谷文博, 綱沢栄二, 日本熱処理技術協会第 22 回学術講演大会概要集, **1** (1986).
- 4) J. Wunning, G. Leyens und G. Woelk, Härtereitechn. Mitt., **31-3**, 132 (1976).
- 5) 浦谷文博, 石神逸男, 辻 新次, 吉仲 平, 大阪府立工業技術研究所報告, **87**, 46 (1985).
- 6) C. Wells, W. Batz and R. F. Mehl, Trans. Met. Soc. AIME, **188**, 553 (1950).
- 7) 田中良平, 鉄と鋼, **53**, 1586 (1967).
- 8) J. Crank, "The Mathematics of Diffusion", 2nd Ed., p.32 (1975) Clarendon Press, Oxford.
- 9) H. J. Grabke, Arch. Eisenhüttenw., **46**, 75 (1975).
- 10) J. H. Kaspersma and R. H. Shay, Metall. Trans. B, **13B**, 267 (1982).
- 11) 奥村 望, 岩瀬厚司, 熱処理, **38**, 194 (1998).
- 12) D. A. Leathard and J. H. Purnell, Proc. Roy. Soc. A, **305**, 517 (1968).
- 13) 安藤 繁, 中山泰宏, 下尾聡夫, 木村 宏, 日本金属学会誌, **50**, 979 (1986).