

(論文)

鋼の化学成分および加熱条件を考慮したフェライト脱炭深さの計算

Calculation of Ferrite Decarburizing Depth Based on Steel Chemical Composition and Heating Conditions



野村正裕*
Masahiro Nomura



難波茂信*
Shigenobu Nanba



家口 浩*(Ph. D.)
Dr. Hiroshi Yaguchi



外山雅雄**
Masao Toyama



吉村健吾***
Kengo Yoshimura

The calculation of ferrite decarburizing depth in relation to the steel chemical composition and heating conditions was investigated. The accuracy of the calculation model was successfully confirmed in comparisons with experimental results. The calculation values were almost the same as the experimental values. This indicates that the model is appropriate for simulation of ferrite decarburizing depth related to steel compositions and heating conditions.

まえがき = 鋼に熱間加工や焼鈍を施すと鋼表面で鋼中炭素と雰囲気ガスが反応し、鋼表面が脱炭することがある。鋼の強度や硬さといった機械的特性は、炭素濃度に大きく影響を受けるため、脱炭が生じた場合、鋼表面の機械的特性は大きく変化する。特に疲労特性については鋼表面の硬さに大きく影響を受けるので、部品によっては表面硬さを向上させるために、表面炭素濃度を積極的に高める処理（浸炭処理）を行うこともある。ところが脱炭が生じれば、これとは反対に表面硬さが低下し疲労特性は低下する。そのため歯車、ばね、軸受などの疲労が重要視される部品では、その製造工程で脱炭を最小限にとどめることが非常に重要である¹⁾。脱炭を最小限にとどめるには、脱炭が生じる焼鈍工程などのプロセス条件や鋼材の化学成分から脱炭深さを計算予測する技術があれば大変有用であると考えられる。

ところで、フェライト脱炭とは脱炭領域がフェライト単独の組織から成る脱炭のことをいう。鋼をフェライトとオーステナイトの二相域温度である約 1,000 ~ 1,150 K の温度に保持すると、鋼表面にフェライト脱炭が起こることが知られている²⁾。また、フェライト脱炭に及ぼす温度の影響についてもいくつかの現象論的な研究がなされており、フェライト脱炭層は 1,073 K 近傍で成長速度が最大になることや^{3)~6)}、加熱速度と冷却速度に影響を受けることなどが報告されている^{2) 6) 7)}。しかしながら、熱処理などのプロセス条件から脱炭深さの予測につながる脱炭モデルに関しては、オーステナイト温度域での脱炭に関するモデル（いわゆるトータル脱炭のモデル）が報告されているのみで⁸⁾、フェライト脱炭モデルの報告は見当たらない。これは、フェライト脱炭のメカニズムが十分に明らかになっていないためであると考えられ

る。

著者らは、鋼の化学成分と加熱条件がフェライト脱炭深さに及ぼす影響に着目し、オーステナイト - フェライト変態と炭素の拡散を組合わせたフェライト脱炭の計算モデルを構築した。また、これを用いてフェライト脱炭深さの計算を行うと同時に、脱炭実験を行いシミュレーション結果の妥当性を検証したので報告する⁹⁾。

1. フェライト脱炭モデルとモデルによる計算

1.1 鋼の化学成分の影響

フェライト脱炭が起こると、図 1 に示すような不連続な炭素濃度プロファイルが観察される。このことからフェライト脱炭は、オーステナイトからフェライトへの相変態を伴う炭素の拡散問題であり、この不連続な濃度プロファイルはフェライトとオーステナイト中で炭素の化学ポテンシャルが連続的になるために生じると考えられる。相変態を伴う拡散問題は Wagner によって解かれているが¹⁰⁾、著者らは、これを炭素の拡散が律速するフェライト変態の式として応用することを試みた¹¹⁾。フェラ

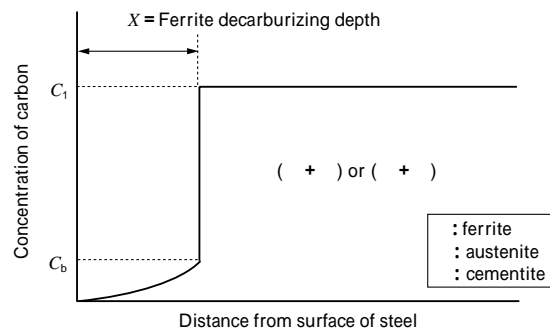


図 1 フェライト脱炭が生じたときの模式的な C 濃度プロファイル
Fig. 1 Schematic carbon concentration profile in ferrite decarburizing

*技術開発本部 材料研究所 **鉄鋼部門 神戸製鉄所 糸鋼圧延部 現職コベルコ科研 ***鉄鋼部門 神戸製鉄所 糸鋼圧延部

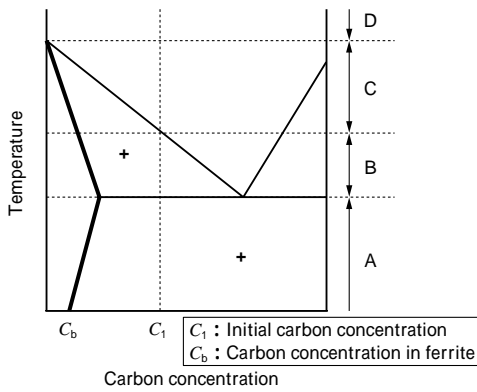


図2 模式的な Fe-C2 元系状態図
Fig. 2 Schematic phase diagram of Fe-C binary system

イト脱炭のメカニズムはこれまで十分には明らかになっていなかったが、フェライト脱炭が上述のメカニズムで生じているとすると、フェライト脱炭深さは以下の式で近似できる。

$$X = \sqrt{\frac{6C_b \cdot D \cdot t}{3C_1 - 2C_b}} \dots\dots\dots(1)$$

ここに、 X は図1に示したフェライト脱炭深さ、 C_b は図2の太線で示したフェライト中炭素の溶解度、 C_1 は鋼中炭素の初期濃度である。 D はフェライト中炭素の拡散係数、 t は時間である。式(1)でフェライト脱炭が計算できるかを確認することで、フェライト脱炭の上記推定メカニズムの妥当性を検証した。なお式(1)は図2のA, Bの温度範囲で適用可能である。これらの範囲では、フェライト脱炭深さはフェライト中炭素の拡散によって律速される。温度範囲Cでは、フェライト脱炭深さはフェライト、オーステナイト両方の領域における炭素の拡散によって律速されるので、厳密には式(1)は適用できない。しかし、オーステナイト領域の炭素の拡散の影響は小さいと考えて、本論文では温度範囲Cでも式(1)を近似的に使用できると仮定した。温度範囲Dでは、炭素濃度がゼロでもフェライトは存在しないので(オーステナイト単相温度域なので)フェライト脱炭は起こらないし、またこの温度域での炭素濃度プロファイル予測の報告もある⁸⁾。以上のことから、本稿では温度範囲A, B, Cを対象とした。

式(1)より、 D, C_b, C_1 および t が既知のときフェライト脱炭深さ X を計算することができる。ここで拡散係数 D は $D = D_0 \exp(-Q/RT)$ であらわすことができ、本稿では、 $D_0 = 0.394 \text{ (mm}^2/\text{s)}$ 、 $Q = 80.22 \text{ (kJ/mol)}$ として計算した¹²⁾。これらの値は純鉄中の炭素の拡散係数として求められたものである。炭素の拡散係数は合金元素の影響を受けるといわれるが、本稿では炭素の拡散に及ぼす合金元素の影響は無視した。 C_b は熱力学データベースシステム Thermo-Calc を用いて計算し¹³⁾、 C_1 は鋼の化学成分を用いた。各鋼種について、鋼表面の酸化スケールがフェライト脱炭に及ぼす影響は小さいと仮定すると、フェライト脱炭深さは C_1 および C_b に値を代入して求めることができる。

表1に示した鋼種について、温度を100分間一定に保持するという条件のもとで、フェライト脱炭深さを計算

表1 鋼材の化学成分
Table 1 Chemical compositions of steels

(mass%)									
Steel	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Ti	V
Steel 1	0.59	2.01	0.92	0.012	0.011	0.01	0.14	0.002	-
Steel 2	0.62	1.57	0.91	0.016	0.011	0.12	0.17	0.003	0.010
Steel 3	0.59	1.50	0.51	0.007	0.008	0.01	0.56	0.003	0.17

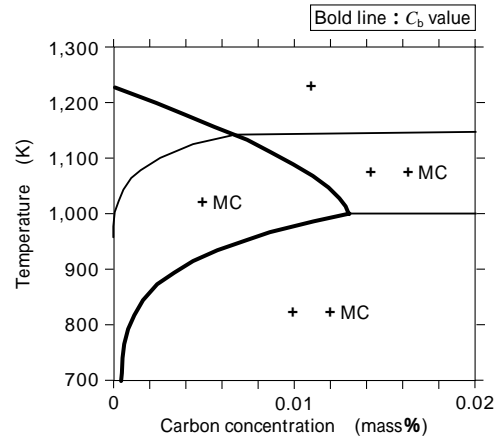


図3 Steel 1 の計算状態図
Fig. 3 Calculated phase diagram of Steel 1

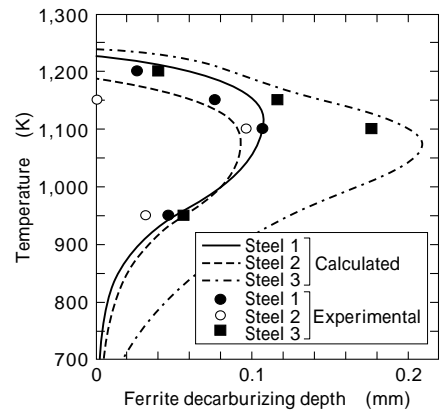


図4 100分等温保持後の Steel 1, 2, 3 のフェライト脱炭深さ
Fig. 4 Ferrite decarburizing depth of Steel 1, 2, 3 after heating for 100 minutes at each temperature

した。また、計算の妥当性検証のため、いくつかの温度で100分間加熱保持した場合のフェライト脱炭深さを組織から評価した。実験の詳細については次章で述べるが、実験による脱炭深さは組織観察によって行うため、表1に示すようにTiやVを含有する場合、微細なTiCやVCを含むフェライト脱炭領域は、組織上フェライトと判定される。よってフェライト域を判定する濃度である C_b は、例えば Steel 1 では図3の状態図に太線で示した(フェライト+MC炭化物)/(フェライト+MC炭化物+セメンタイト)、(フェライト+MC炭化物)/(フェライト+MC炭化物+オーステナイト)、またはフェライト/(フェライト+オーステナイト)の境界炭素濃度を用いた。図4に示すように、計算結果から、フェライト脱炭の大部分はおよそ1,000~1,200K程度のフェライト+オーステナイトの二相組織の温度領域で起こり、フェライト脱炭の成長速度は1,073K近傍で最大となることがわかった。これは、従来報告された実験結果と同じ挙動である²⁾⁴⁾⁻⁶⁾。

1.2 加熱条件の影響

フェライト脱炭の起こる温度が一定でないとき、フェライト脱炭深さは式(1)を時間で積分することで求めることができる⁹⁾。 C_b と D は温度の関数であるが、加熱のヒートパターン（温度と時間の関係）より温度の関数から時間の関数へ変換できるので、式(1)は時間の関数として積分できる。実際の積分計算は数値的に行いフェライト脱炭深さ X を求めた。計算結果については後に示す。

2. 実験

計算結果の妥当性を確認するために、表1に示す鋼種を用いて実験を行った。初期状態での表面脱炭の影響を除くために、圧延線材を図5に示すような形に長手方向に切削した。試験片を 973 K, 1,123 K, 1,173 K および 1,223 K の一定温度の炉に大気中で 100 分間保持し加熱完了後空冷した。連続加熱冷却の条件としては、例えば図6に示すように、試験片を常温から 973 K まで加熱した後炉内で冷却した。フェライト脱炭深さは加熱後の試験片の断面組織を観察して求めた。

3. 結果と考察

3.1 フェライト脱炭深さに及ぼす化学成分の影響

さまざまな温度に 100 分間加熱保持した Steel 1 の組織を写真1に示す。フェライト脱炭深さは、図4に示す計算結果と同じように 1,073K 付近で最大となる傾向がみられた。また Steel 2, 3 も同様の挙動を示した。図4に、計算結果に加えて組織から評価したフェライト脱炭深さも示す。実験と計算結果を比較すると、両結果は多くの温度でほぼ一致しており、特に 1,100 K 以上ではよく一致していることがわかる。したがって、式(1)に示したフェライト脱炭モデルは妥当なモデルとして適用できると考えられる。また、本モデルでフェライト脱炭を計算できたことから、フェライト脱炭は先に述べたとおり相変態を伴う拡散現象であるといえる。

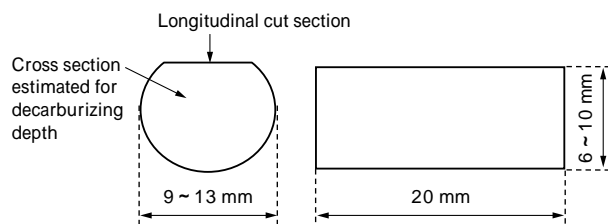


図5 試料の模式図
Fig. 5 Schematic shape of specimen

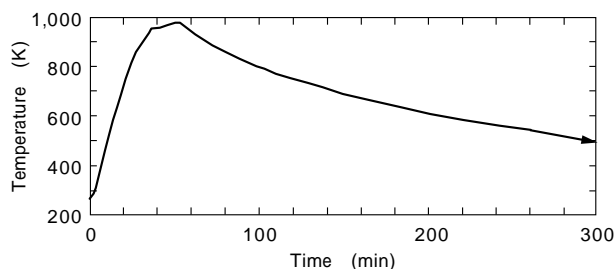


図6 焼鈍条件
Fig. 6 Annealing conditions

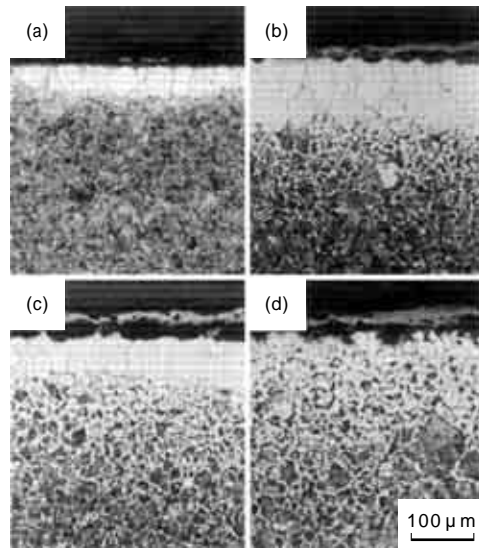


写真1 973 K(a), 1,123 K(b), 1,173 K(c), 1,223 K(d) で 100 分焼鈍後の Steel 1 の組織

Photo 1 Microstructures of Steel 1 after heating for 100 minutes at 973 K; (a), 1,123 K; (b), 1,173 K; (c) and 1,223 K; (d)

以下に結果の詳細について述べる。Steel 1 について、973K では計算と実験結果はそれぞれ $60 \mu\text{m}$ と $50 \mu\text{m}$ でよく一致している。一方 Steel 2, 3 では、973 K の実験結果は計算結果より小さな値を示している。表1に示すように、Steel 2, 3 にはそれぞれ 0.01 および 0.17 mass% のバナジウムが含まれているので、VC または TiC としての微細炭化物が存在するはずである。さらに Steel 3 は、セメンタイト安定化元素のクロムを多量に含有している。973 K は A_1 変態点以下（図2に示す温度範囲A）であるため、脱炭によって鋼材表面に観察されるフェライト脱炭領域は、パーライト中のセメンタイトが溶解し炭素が拡散流出することによって形成される。微細な MC 炭化物と多量のクロムがこの温度におけるセメンタイトの溶解に影響を及ぼしたために、Steel 2, 3 の実験で得られたフェライト脱炭深さは計算値より小さくなったと推測される。

1,123 K では、図4に示すように、いずれの鋼においても実験値と計算値はほぼ同じであった。この温度は A_1 変態点以上で A_3 変態点以下（図2に示した温度範囲B）であるため、フェライト脱炭領域はセメンタイトの溶解によって形成されるのではなく、オーステナイトからフェライトへの相変態によって形成される。したがって、フェライト脱炭領域の形成メカニズムに及ぼす MC 炭化物の影響は A_1 変態点以下のときとは異なる。さらに、図3からわかるように、1,123 K 近傍では MC 炭化物の固溶限は大きくなり、温度の上昇に伴って MC 炭化物の固溶限はさらに増大する。よってこの温度では MC 炭化物の影響が小さくなり、その結果フェライト脱炭はモデル計算どおりに起こったと考えられる。さらに、1,173 K 以上でも、1,123 K と同様に MC 炭化物の影響が小さくなった結果、図4に示すように、計算値と実測値はよく一致した。

写真1において、1,123 K 以上に加熱された試験片では、フェライト脱炭領域の下にフェライト+パーライト組織のパーライト分率が徐々に増加する傾向が認められる。1,123 K は、図2に示した温度範囲Cにあるので、

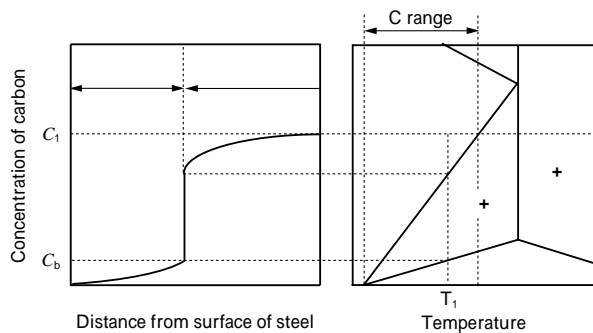


図7 フェライト脱炭が生じたときのC濃度プロファイル(図2温度範囲Cのとき)
Fig. 7 Carbon concentration profile in ferrite decarburizing at C temperature range shown in Fig. 2

炭素の拡散はオーステナイト中でも起こり、温度一定の条件のもとでの炭素濃度プロファイルは、図7に示すように、オーステナイト領域で濃度勾配を持っていたと思われる。したがって、オーステナイト領域において濃度勾配が存在するために、冷却過程を通じてフェライト+パーライトのミクロ組織でパーライト分率が徐々に増加したと考えられる。また、この組織分率が徐々に変化する領域の深さは加熱温度の上昇とともに増大した。これは、温度の上昇とともに炭素の拡散流出が増大し、オーステナイト中の炭素濃度の濃度勾配を有する深さが増大するからであると考えられる。

すでに述べたように、計算で求めたフェライト脱炭深さは実験値と比較的によく一致するので、フェライト脱炭深さは式(1)で計算できることがわかる。計算と実験が一致したことは、著者らの実験では鋼表面のスケールの影響が小さかったことを示している。ただ、スケールが脱炭に影響するという報告もある¹⁴⁾。実際には、写真1に見られるように多少のスケールが観察された。このモデルをさらに広く一般に使用するためには、スケールの影響を取入れることが必要であると考えられる。これは今後の課題である。また、本稿で用いた拡散係数は、合金元素の影響は考慮していない純鉄中炭素の拡散係数である。炭素拡散に及ぼす合金元素の影響を考慮しなくてもフェライト脱炭深さが計算予測できたのは、今回の実験範囲では、炭素の拡散に及ぼす合金元素の影響が小さかったためであると考えられる。

3.2 フェライト脱炭深さに及ぼす加熱条件の影響

Steel 1 を用いて、加熱条件の影響を調べた。図6の条件で加熱したSteel 1の組織を写真2に示す。この写真より、フェライト脱炭深さは約20 μ mであることがわかる。一方、式(1)を時間積分して計算したフェライト脱炭深さもほぼ同じ値になった。このことから、フェライト脱炭深さは式(1)の時間積分モデルを用いて、加熱条件を考慮して計算で求めることができる。式(1)は、先に述べたように鋼の化学成分も考慮しているので、本モデルは、鋼の化学成分と加熱条件を同時に考慮してフェライト脱炭深さを計算できることになる。

むすび=疲労特性に大きな影響を及ぼすフェライト脱炭は、従来プロセス条件や化学成分からその挙動を予測す

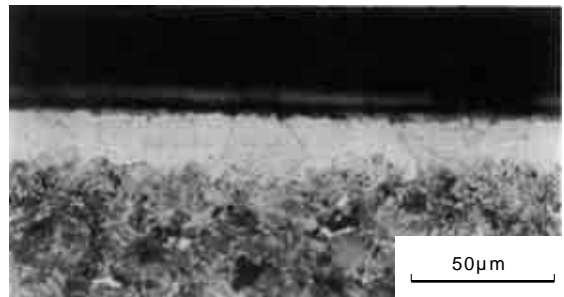


写真2 図6の条件で焼鈍した後のSteel 1の組織
Photo 2 Microstructures of Steel 1 after annealing in the condition shown in Fig. 6

ることができなかったが、本稿では、これらを考慮してフェライト脱炭を計算予測することを試みた。

フェライト脱炭深さの計算モデルを構築し、実験結果と比較してモデルの妥当性を確認した。これより、疲労特性の観点から脱炭の最小限化が重要となる歯車、ばねといった部品でも、本モデルを活用することで成分、プロセス条件からフェライト脱炭深さの計算予測が可能となった。また、本モデルを効果的に用いればフェライト脱炭深さを最小限化することが可能であり、本モデルから明らかになったフェライト脱炭メカニズムを考慮して、鋼材成分や操業条件の適正化を検討している。

以上より、本稿で検討したフェライト脱炭予測モデルから主な結論として以下が言及できる。

- 1) 鋼の化学成分を考慮して計算したフェライト脱炭深さは、温度一定の条件のもとでは実験値と比較的によく一致した。よって、このモデルを用いれば化学成分を考慮してフェライト脱炭深さの計算が可能である。
- 2) 加熱条件を考慮して計算したフェライト脱炭深さも実験結果とよく一致した。よって、化学成分と加熱条件を同時に考慮してフェライト脱炭深さを計算することも可能である。
- 3) チタン、バナジウム、クロムを多量に含有する鋼を973 Kに加熱した場合には計算精度は不十分であった。TiC または VC のような微細な MC 炭化物やセメントサイトを安定化するクロムは、フェライト脱炭領域の形成に影響を及ぼすと推測される。

参考文献

- 1) W. A. Pennington : Trans. ASM, 37 (1946) p.48.
- 2) 大谷三郎ほか：鉄と鋼, Vol.66, No.11 (1980) p.S1279.
- 3) J. A. Kowalik et al. : Scripta Metallurgica, 18 (1984) p.305.
- 4) K. M. Gorman et al. : Proc. Int. Conf. Solid Phase Transformation 1981, (1982) p.825.
- 5) 高田勝典ほか：鉄と鋼, Vol.72, No.5 (1986) p.S659.
- 6) 泉 総一ほか：鉄と鋼, Vol.68, No.12 (1982) p.S1086.
- 7) 富永治朗ほか：鉄と鋼, Vol.66, No.11 (1980) p.S1278.
- 8) N. Birks et al. : J. Iron and Steel Institute, (1970) p.81.
- 9) M. Nomura et al. : ISIJ International, 40 (2000) p.619.
- 10) W. Jost : Diffusion in Solids, Liquids and Gases, Academic Press Inc., New York, N. Y., (1960) p.69.
- 11) R. P. Smith : Trans. Met. AIME, 224 (1962) p.105.
- 12) A. E. Lord et al. : Acta metall., 14 (1966) p.1659.
- 13) B. Sundman et al. : CALPHAD, 9 (1985) p.153.
- 14) T. Nakamura et al. : CAMP-ISIJ, 7 (1994) p.781.