

以下の予稿の原稿に対して修正追加(有本 享三)

有本享三, 金 伝栄, 田村茂之, 鮎谷清司, 田島 守, “逆硬化現象の発生メカニズムについて”
第59回 日本熱処理技術協会講演大会, 2004年, 12月, pp23-24

逆硬化現象の発生メカニズムについて [注 A]

1. はじめに

ベアリング鋼部品の油焼入れにおいて、過去に表面の硬さが中心に比べて低下するという現象が報告されている。これは、硬さが通常とは逆の分布を示すという理由で、清水ら⁽¹⁾により“逆硬化現象”と名づけられた。清水ら⁽¹⁾は、この現象を円柱試験片の空气中と食塩水中での2段階冷却によって再現し、さらには、その原因をCCT曲線に基づく図式解法を用いて考察した。

清水らの円柱逆硬化試験に対して、有本ら⁽²⁾はシミュレーションを適用し、表面での硬さの低下が空冷中に生じるパーライト変態によるものであることを明らかにした。また、空冷中の温度回復現象が、パーライト変態の挙動に影響を及ぼしていることを確認した。しかし、温度回復現象については、清水らが冷却曲線を報告していないため、検証が行えない状態となっていた。

本研究では、清水らの逆硬化試験を再現し、さらにはこれに対してシミュレーションを適用することによって、現象発生メカニズムの解明を試みた。

2. 試験

本研究では、外径20mmのSUJ2鋼円柱試験片を、清水ら⁽¹⁾と同様に、空冷後、5%食塩水に焼入れた[注 B]。試験片の形状はFig. 1に示すものであり、円柱の中心と中心から半径方向に5mmおよび8mmの位置には熱電対用の穴を設けた。また、Table 1には、試験に用いたSUJ2鋼の化学組成を示す。

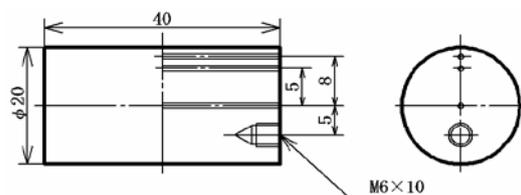


Fig. 1 逆硬化円柱試験片

Steel	C	Si	Mn	P	S	Cr
SUJ2	0.99	0.21	0.4	0.09	0.04	1.51

円柱試験片は、約840℃で40分間保持することによってオーステナイト化を行なった。空冷時間は、60sから120sの間を10s単位で分割した7種類とし、その違いが食塩水冷却後の硬さ分布に及ぼす影響を調べた[注 C]。

3. シミュレーションと考察

シミュレーションは、拡散型変態に対してJMAK (Johnson -Mehl - Avrami - Kolmogorov)式を適用し、さらに変態潜熱を考慮した有限要素法⁽²⁾プログラムを用いて行なった[注 D]。

空冷中の冷却曲線は、Fig. 2に示すように試験およびシミュレーションのい

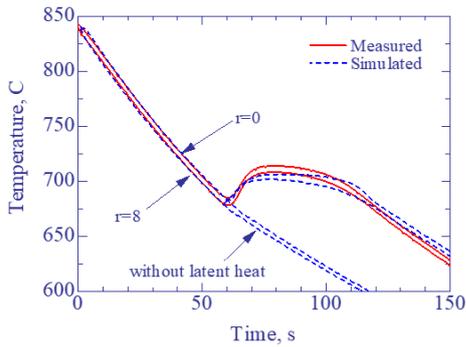


Fig.2 空冷による冷却曲線

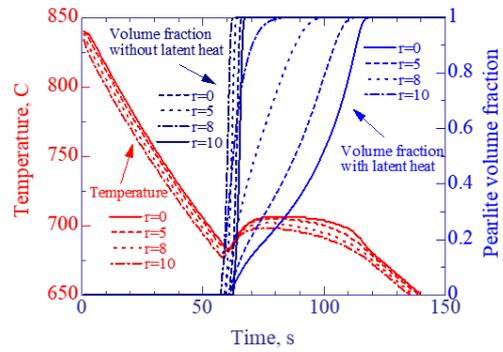


Fig.3 温度とパーライト体積分率

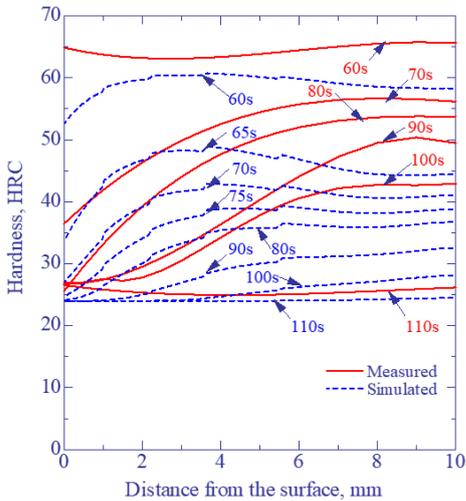


Fig.4 円柱の硬さ分布

ずれにおいても同様の温度回復現象を示した。図中で $r=0$ および 8 と記した曲線は、それぞれ円柱中心および中心から半径方向に 8mm 位置での温度変化を示す。なお、図中に示す潜熱を無視した場合の冷却曲線は、実験結果と全く一致しない。

Fig. 3 には、シミュレーションによる空冷中の温度とパーライト体積分率の時間変化を示す。この図より、温度回復と相変態が同時期に生じることが分かる。試験片中心では、変態の発生が試験片表面よりも遅い。また、その後の変態の進行についても、表面部に比べて際だった遅れを生じる。このような変態挙動が発生するのは、温度回復によって、鋼の変態活発度に対する温度依存性の高い温度域で変態が進行するためである⁽²⁾。なお、Fig. 3 に示すように、潜熱を無視した計算ではこのような変態挙動は生じない【注 E】。

Fig. 4 には、シミュレーションから得られた円柱試験片の硬さ分布を、試験結果と比較して示した。シミュレーションによる硬さ分布の形状は、試験結果と同様に、明らかに逆硬化現象を示している。

4. まとめ

円柱の逆硬化試験により、空冷中の冷却曲線における温度回復現象の発生を確認した。シミュレーションによっても、温度回復現象ならびに逆硬化現象が予測できた。なお、本文中のシミュレーションには、(株)CRC ソリューションズが開発した熱プロセスシミュレータ FINAS/TPS を使用した。

参考文献

- (1) 清水信善, 田村今男, 鉄と鋼, Vol. 61, 1975, pp3129-3138. 【注 F】
- (2) K. Arimoto, D. Huang, D. Lambert and W. T. Wu, Proceedings of the 20th Heat Treating Conference. St. Louis: ASM International, 2000, pp737-746. 【注 G】

注記

[A] 本予稿は以下の記事において引用されている。

岡村一男，“固相変態を伴う材料挙動とモデリング(1)：熱処理シミュレーションの概論”，機械の研究，Vol. 71(1)，pp.60-67，2019

この記事では，“熱処理シミュレーションの利点と限界”を解説する際に，逆効果現象を取り上げている．そこでは，清水と田村が提案した潜伏期間消費を考慮した CCT 線図の補正解法は，冷却速度が変化しても相変態の予測が可能であると述べた後に，以下の記述によって本予稿が引用されている．

“その例として，有本らは軸受鋼をオーステナイト化した後，空冷に引続いて急冷することによって蒸気膜崩壊を模擬する実験とそのシミュレーションを行い，次に紹介する逆硬化現象を予測できると報告している”．

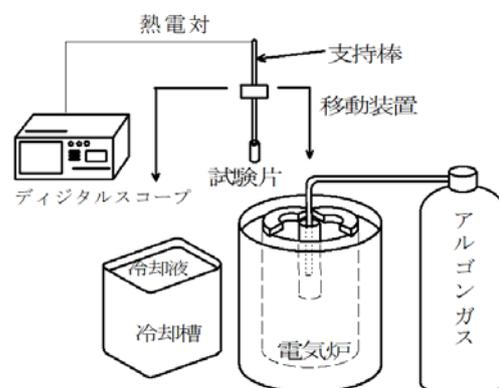
この引用文の後，逆硬化現象の“メカニズム”が，“冷却曲線の模式図”を用いて解説されている．なお，この模式図中の冷却曲線には温度回復現象は現れていない．

本予稿に内容を付け加えた記事が，以下のように雑誌に発表されている．

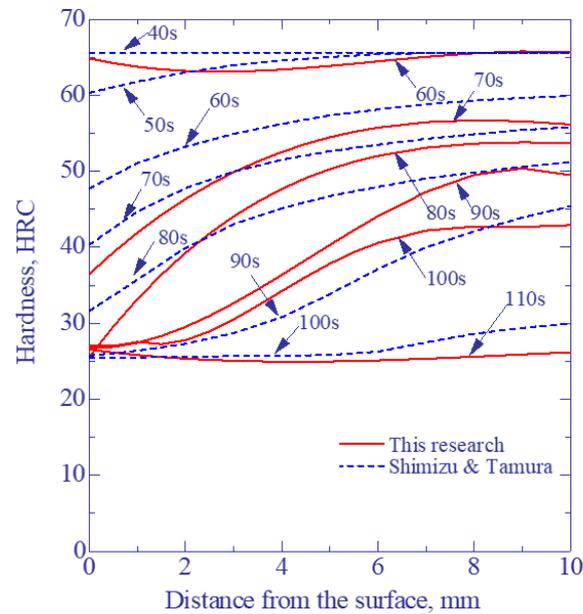
K. Arimoto, “Inverse Quench-hardening Phenomena in Steels and Their Origin”, Int. J. Microstructure and Materials Properties, Vol. 11 (3-4), 2016, pp. 214-228.

doi.org/10.1504/IJMMP.2016.079148

[B] 試験装置の外観写真と概略図を以下に示す．



[C] 本実験と清水-田村の実験における硬さ分布を比較したグラフを以下に示す。

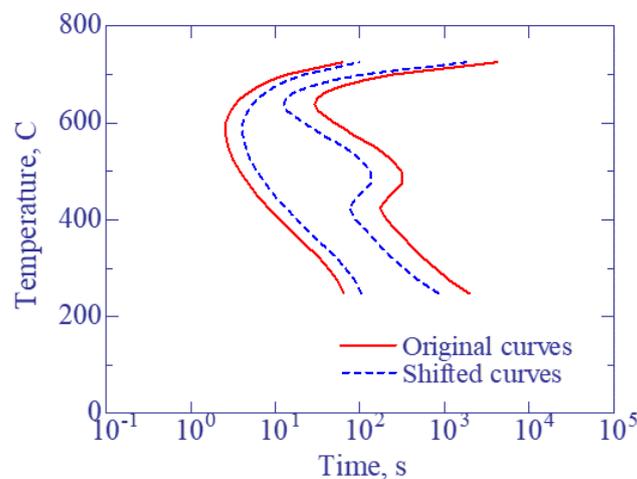


本研究では断面 4 点での測定値を平均した。逆硬化現象は空冷時間 70s~100s においてが発生したが、清水と田村の報告では空冷時間は 50s~90s であった。

[D] “JMAK 式”は“KJMA 式”と呼ばれることもある。ここでは西澤(2005: p-233)の解説にしたがって“JMAK 式”とした。

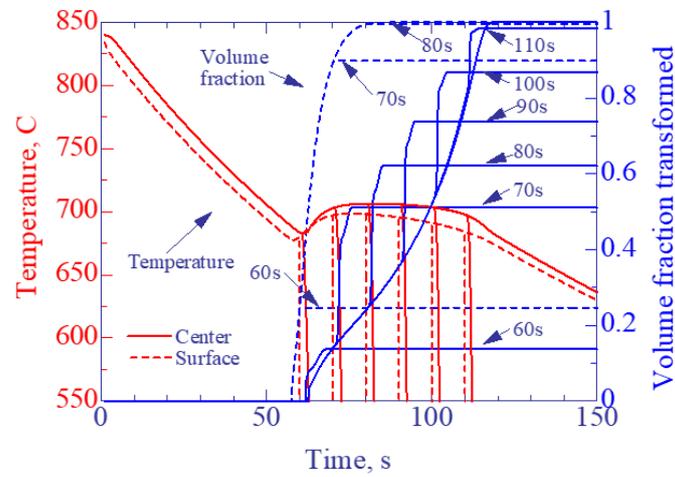
西澤泰二, 2005, “マイクロ組織の熱力学”, 日本金属学会. (Nishizawa, T., 2008, “Thermodynamics of Microstructures”, ASM International.)

本シミュレーションで用いた TTT 線図(Shifted curves)を以下に示す。



本シミュレーションでは、潜熱の値として 75.8kJ/kg を用いた。

[E] 以下のグラフは，空冷/食塩水焼入れシミュレーションによる試験片中心と表面での冷却曲線とパーライト体積分率の変化を示す．



[F] https://doi.org/10.2355/tetsutohagane1955.61.15_3129

[G] この参考文献については，その内容のかなりの部分が以下の邦文資料に転載されている．

有本享三，“逆硬化現象解明の今日的意味”

焼入れと組織制御研究部会 研究成果発表会：2001年3月16日

(この発表会資料の原稿に基づいてアリモテック資料が作成され，ネット上に公開されている．)