

# 新成分設計手法に基づく 転動疲労寿命に優れる中炭素系新軸受け用鋼\*

川崎製鉄技報  
34 (2002) 2, 104-108

## Advanced Medium Carbon Steel for Bearing Use with Excellent Rolling Contact Fatigue Life Developed by Using New Alloy Design Method



松崎 明博

Akilhiro Matsuzaki  
技術研究所 厚板・条鋼・接合研究部門  
主任研究員(部長補)



星野 俊幸

Toshiyuki Hoshino  
技術研究所 厚板・条鋼・接合研究部門  
主任研究員(課長)



萩原 浩

Hiroshi Hagihara  
本島製鉄所  
商品技術部条鋼室  
主任(主席部長)

### 要旨

JIS-SUJ2 鋼と同等以上の転動疲労寿命および2次加工性能を有する中炭素系軸受け鋼 NKJ65M 鋼を開発し、実用化した。SUJ2 鋼では必須である拡散焼鈍工程の省略のために、共晶炭化物生成の予測手法を開発し、拡散焼鈍工程の省略が可能となる組成の予測が可能となった。この手法に基づき SUJ2 鋼よりも低C、Cr系を基本組成とし、各種特性および2次加工性に及ぼすC、Si、Crなどの元素の効果を明らかにし、開発鋼の鋼組成 (0.75 mass% C-0.55 mass% Si-1.1 mass% Mn-0.5 mass% Cr) を決定した。開発鋼には共晶炭化物は認められず、拡散焼鈍工程の省略が可能となった。開発鋼は、セメントタイトの球状化率が SUJ2 鋼と同等であり、冷間加工性、切削性などの2次加工性に優れる。また開発鋼は、SUJ2 鋼と同等以上の優れた転動疲労性能を有する。

### Synopsis:

A medium carbon steel for bearing use, NKJ65M, with superior cost-performance to conventional steel, JIS-SUJ2, has been successfully developed. A method to evaluate the formation of eutectic carbides in cast steel was studied, which clarified the chemical compositions to enable the exclusion of diffusion heat treatment process. The chemical composition of the developed steel was determined as 0.75 mass% C-0.55 mass% Si-1.1 mass% Mn-0.5 mass% Cr through further study from the points of rolling contact fatigue property and productivity in cold working and machining. Eutectic carbides were not observed in the developed steel, which enabled the exclusion of diffusion heat treatment process. The developed steel achieved excellent cold forgeability and machinability, owing to the proper spheroidized microstructure. The rolling contact fatigue life of the developed steel was as excellent as that of SUJ2.

### 1 緒 言

軸受けは産業機械の回転駆動部分に使用される重要部品である。軸受けに用いられる鋼の中では、JISに規定されている高炭素クロム軸受け鋼 SUJ2 鋼 (1.0 mass% C-1.5 mass% Cr) が最も多く使用されている。SUJ2 鋼は軸受け用鋼の重要機能である転動疲労性能に優れており、その基本組成が定まってから今日までおおよそ100年間使用されている。この間、SUJ2 鋼として代替可能な鋼の研究もなされてはいるが、まだ本格的には実用化はされていないのが現状である。しかし、昨今の部品の軽量化や低コスト化の要求の増大にともない、SUJ2 鋼と同等以上の性能を有し、かつコストが低い新しい鋼材の開発が望まれていた。当社はこのようなニーズに基づき、

NTN(株)と共同開発を行い中炭素系軸受け鋼 NKJ65<sup>2)</sup>をすでに開発、実用化した。本報告は、その冷間加工性をさらに改良した NKJ65M 鋼についてまとめたものである。

SUJ2 鋼では、鑄造組織に粗大な共晶炭化物が存在し、転動疲労寿命を顕著に劣化させる。そのために高温での長時間の拡散焼鈍処理を行い、共晶炭化物を固溶させた後に、熱間加工される。またこの拡散焼鈍は鋼材の高コスト要因となり、また製造設備の制約も生じてくる。そこで、NKJ65M 鋼の開発にあたっては、まず拡散焼鈍プロセスを省略できる鋼、すなわち鑄造段階で共晶炭化物を生成しない鋼を開発することを目標とした。そのために、冶金的観点から鑄造組織、組成の予測および評価手法の検討を実施した。

さらに、SUJ2 鋼と同等以上の優れた転動疲労性能および2次加工性を有することが開発鋼の目標特性である。そのために、球状化焼鈍後の組織、性能に及ぼす鋼組成の影響とともに、最終製品の転動疲労性能について検討を行った。

\*平成14年2月14日原稿受付

本報告では、NKJ65M 鋼の設計思想、検討結果とともに、その性能について紹介する。

## 2 開発鋼の成分設計および考え方

### 2.1 拡散焼鈍プロセスの省略のための考え方および検討結果

Fig. 1 に熱力学計算ソフト Thermo-Calc<sup>®</sup>を用いて計算した、SUJ2 鋼の Fe-C 平衡状態図を示す。成分が均質であれば SUJ2 鋼では、L (液相) →  $\gamma$  (オーステナイト) + セメントタイトの共晶反応は起きない。しかし、実機スケールの铸造では、凝固時のマクロ偏析のために、铸片中心部に、C および合金元素が濃化するため共晶反応が起こる。この共晶炭化物は安定であるため、その後の加熱、圧延工程で消失せず、最終製品の性能に大きな悪影響を及ぼす。そこで、凝固時のマクロ偏析を考慮して、铸片中心部で共晶反応が生成しないような鋼組成の予測、判定手法を検討した。

Fig. 2 に予測、判定手法を示す。まず、種々の高炭素鋼について

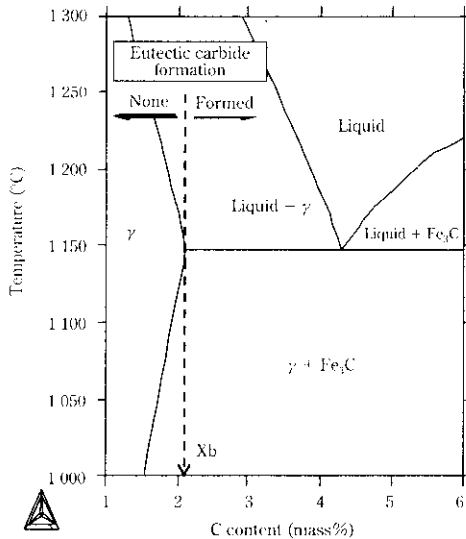


Fig. 1 Equilibrium phase diagram of SUJ2 steel, calculated by Thermo-Calc

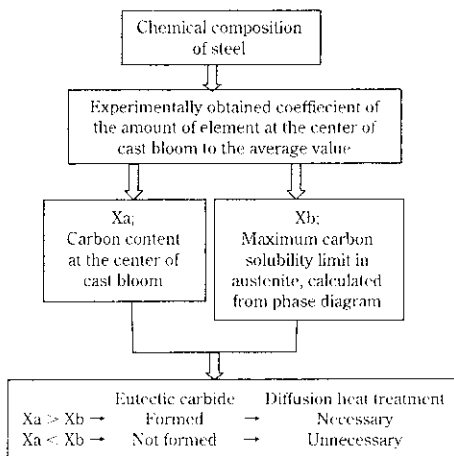


Fig. 2 Criteria of chemical composition to suppress the formation of eutectic carbides and to enable the exclusion of diffusion heat treatment to extinguish eutectic carbides

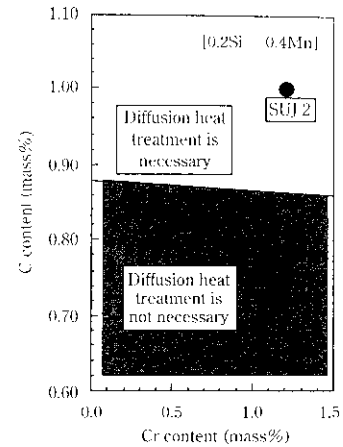


Fig. 3 An example of the evaluation of eutectic carbide formation in the case of SUJ2 steel

铸片中心部の C および合金元素の濃化量を実測し、母溶鋼に対する各元素の偏析比を設定する。次に、検討鋼の組成とこの偏析比から、铸片中心部相当の組成を求め、その組成の平衡状態図を計算する。さらに、铸片中心部の C 量 (Xa) と、状態図から求められる  $\gamma$  相の最大 C 固溶限の値 (Xb) を計算する。共晶反応の有無は、Xa と Xb の大小関係で判断できる。

Fig. 3 に SUJ2 鋼へ適用した結果を示す。図中の C および Cr 量は、検討鋼の公称組成 (母溶鋼組成) で示した。SUJ2 鋼は、共晶炭化物が生成する領域となっており、本評価手法が妥当であることを示している。また、共晶反応の生成に対しては、C 量を低減することが最も有効である。

本手法に基づいて、開発鋼の拡散焼鈍プロセスの省略可否の観点から、成分検討を行なった。

### 2.2 転動疲労性能に及ぼす基本組成の影響

転動疲労は軸受け用鋼にとって最も重要な特性である。Fig. 4 に転動疲労性能に及ぼす影響因子をまとめた。本開発は、基本組成の変更となるので、図中の組織因子が関与することになる。最も大きな影響因子は、マルテンサイト相の硬さおよび組織形態であり、いずれも固溶 C 量に依存する<sup>3-8)</sup>。マルテンサイト相の硬さは C 量の増加にともない上昇する。しかし、硬さが過度に高くなると、内部歪みの増加やマルテンサイト相の下部組織の変化で、逆に寿命は低下する。門間<sup>9)</sup>は、高 C 域ではマルテンサイト相の内部歪みが増大するため、疲労寿命は 0.45% C 付近で極大となることを示した。一方、Kino<sup>10)</sup>は 0.78 mass% C でマルテンサイト組織サイズが最小となるため、寿命は極大となると報告している。このように、固溶 C 量の影響についてはまだ明瞭ではない点が残っているものの、

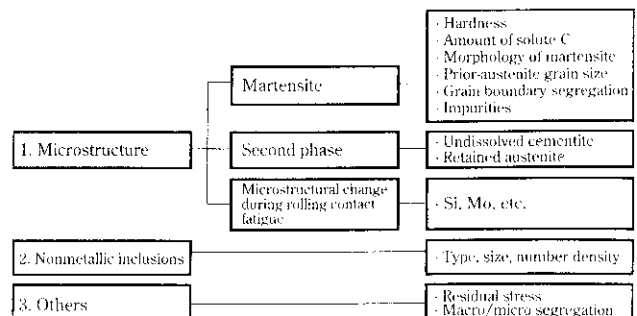


Fig. 4 Factors affecting the rolling contact fatigue life

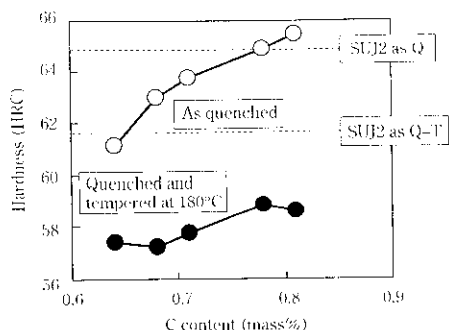


Fig. 5 Effect of C content on the hardness in 0.25 mass%Si-0.75 mass%Mn steel

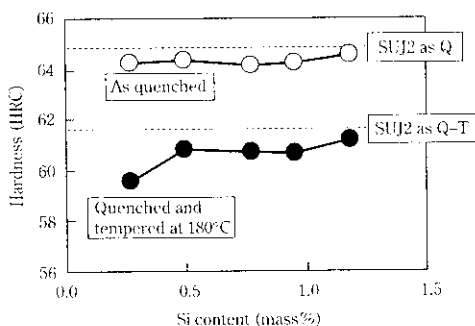


Fig. 6 Effect of Si content on the hardness in 0.85 mass%C-0.75 mass%Mn steel

組織および硬さを通じて転動疲労寿命への影響が大きいことは明らかであり、新開発鋼のC量はSUJ2鋼より低減させることとした。

SUJ2鋼は、マルテンサイト相中に未固溶炭化物を大量に含有している。したがって、マルテンサイト中の固溶C量は鋼組成の値よりも低値である。本開発では、拡散焼鈍省略の観点からC量の低減が必須であるが、固溶C量および残留炭化物量に影響を及ぼす合金元素とくにCr量の適正化も同時に行えば、SUJ2鋼と同等以上の転動疲労性能を得ることは可能と考えられる。

以上の考えを基に、本開発では、SUJ2鋼よりも低C、Cr組成を中心に検討し、転動疲労性能の一次評価のために、焼入れ焼もどし後の硬さがSUJ2鋼と同等となる基本組成の検討を実施した。Fig. 5に硬さに及ぼすC量の影響を示す。焼入れまま硬さは、C量の増加にともない上昇し、0.8mass% C程度でSUJ2鋼と同等レベルとなる。しかし、焼もどし後の硬さは著しく低下し、SUJ2鋼と同等の硬さは得られない。したがって、Siなどの焼もどし軟化抵抗を上げさせる合金元素の添加が必要である。Fig. 6に硬さに及ぼすSi量の影響を検討した結果を示す。焼入れまま硬さは変化しないものの、焼もどし後の硬さがFig. 5に比べて大きく上昇しており、焼もどし後の硬さ確保に、Siなどの合金元素の添加が有効である。

一方、転動疲労の影響因子として組織変化<sup>10)</sup>がある。これは、転動面直下の金属組織が疲労により変化し、これが剥離起点となって、寿命を低下させる現象である。当社はこれまでに、Siが組織変化の遅延効果を通じて転動疲労寿命を上昇させることを報告<sup>11)</sup>している。Fig. 7にSUJ2鋼の転動疲労性能に及ぼすSi添加の効果を示す。通常の0.25 mass%Siに対し、1.0 mass%Siに増加することにより疲労寿命が顕著に増加する。Photo 1に疲労過程での転動面直下の組織変化を示すが、Siの上記効果が明らかである。したがって、Siの増量は、焼もどし後の硬さ確保のみならず、転動過程での組織変化抑制による疲労寿命の向上効果も期待できる。

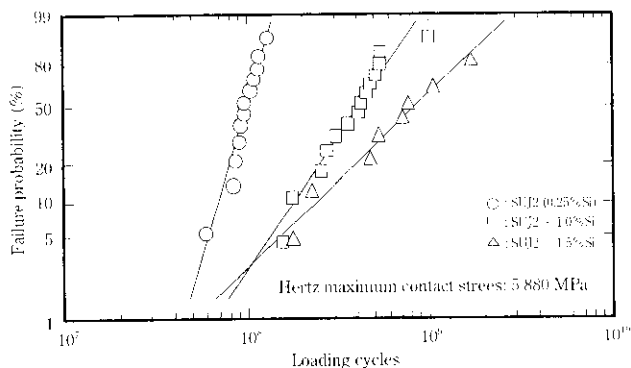


Fig. 7 Effect of Si content on the rolling contact fatigue life in SUJ2-base steel

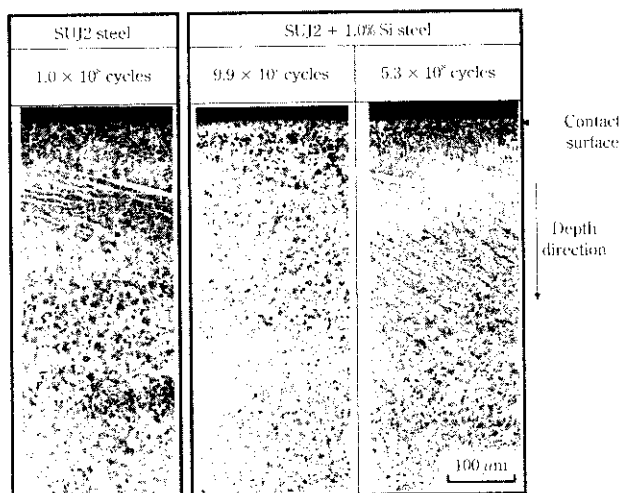


Photo 1 Microstructure underneath the rolling contact surface in the specimen fatigue tested for various numbers of cycles

### 2.3 加工性の向上のための組織、成分設計

軸受け鋼は、冷間加工や切削加工等の冷間成形工程があり、そのために球状化焼鈍により軟質化する必要がある。冷間成形性向上にはセメンタイトの球状化率の向上が重要であり、そのためにはCおよびCr量の適正化が課題となる。SUJ2鋼はCおよびCr含有量が高いため、セメンタイトの球状化処理が比較的容易である。それに対し、開発鋼は前述の開発目標達成の要請からC、Cr量を低く設定する必要がある。そこで、球状化率確保の観点から適正な組成、熱処理条件の検討を行った。Fig. 8は、セメンタイトの球状化率に

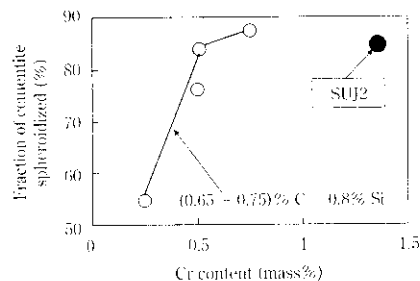


Fig. 8 Effect of Cr content on the fraction of cementite spheroidized in (0.65-0.75) mass% C-0.8 mass% Si steel

及ぼす Cr 量の影響を示す。約 0.5 mass%Cr の添加で SUJ2 鋼と同等の球状化率が得られており、SUJ2 鋼よりも少ない C、Cr 量でも十分に冷間加工性を確保可能である。

### 3 開発鋼の性能

#### 3.1 鋼組成

前章の検討に基づき選定した開発鋼の鋼組成を Table 1 に示す。SUJ2 鋼に対し、C 量は少なく、また Cr 量も低値とした。一方、Si 量は硬さ、転動疲労寿命の観点から増量した。なお、NKJ65M 鋼中の酸化物系存在物は SUJ2 鋼と同様に低減している。

#### 3.2 共晶炭化物の抑制

铸造組織を Photo 2 に示す。SUJ2 鋼では共晶炭化物が認められるのに対し、開発鋼では熱力学的計算に基づく成分設計の通り、共晶炭化物は認められない。この結果、本開発鋼は拡散焼鈍工程の省略が可能となった。以下には、拡散焼鈍工程を省略した開発鋼の性能を示す。

#### 3.3 球状化焼鈍後の性能

Table 2 に、球状化焼鈍処理後の代表的な性能を示す。また、球状化組織を Photo 3 に示す。球状化焼鈍後の組織、球状化率は、SUJ2 鋼とほぼ同等である。硬さ、引張強度も同等の値である。

Fig. 9 に冷間据え込み試験時の割れ発生率と据え込み率の関係を示す。開発鋼は、SUJ2 鋼と同等以上の値を示しており、優れた冷

Table 2 Representative properties of developed steel after spheroidizing heat treatment

Steel	Ratio of cementite spheroidized (%)	Hardness (Hv)	Tensile strength (MPa)
NKJ65M	84.5	185	646
SUJ2	85.5	183	651

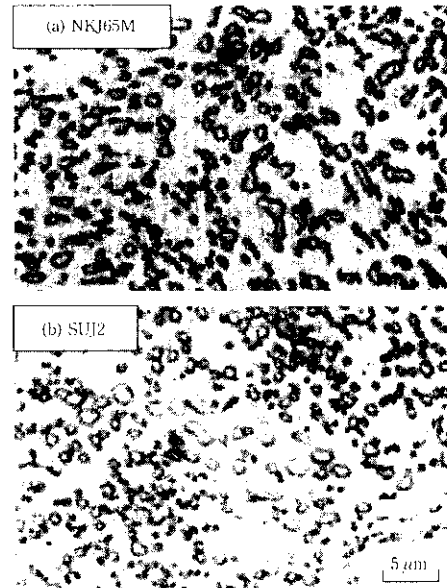


Photo 3 Microstructures after spheroidizing heat treatment

Table 1 Chemical composition of developed steel

Steel	C	Si	Mn	Cr
NKJ65M	0.75	0.55	1.1	0.5
SUJ2	1.0	0.25	0.4	1.5

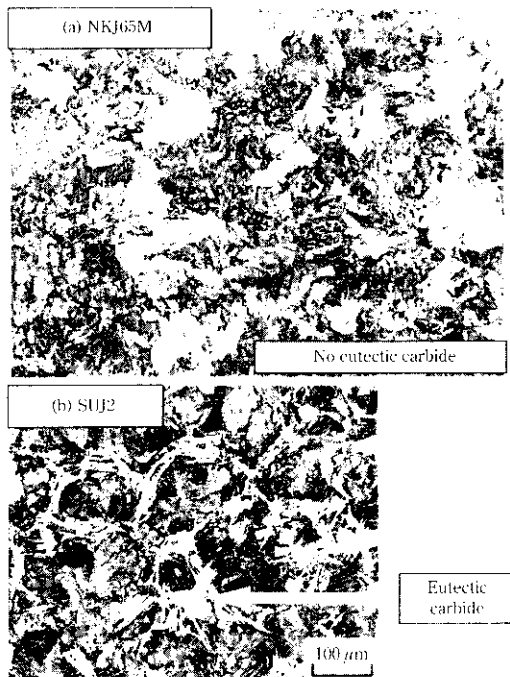


Photo 2 Appearance of the formation of eutectic carbides in cast bloom

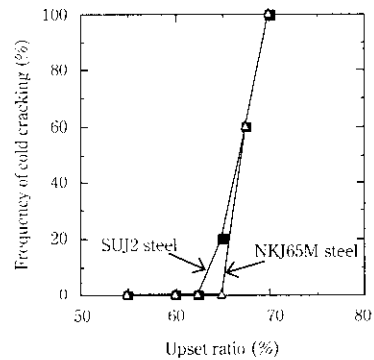


Fig. 9 Cold forgeability of developed steel after spheroidizing heat treatment

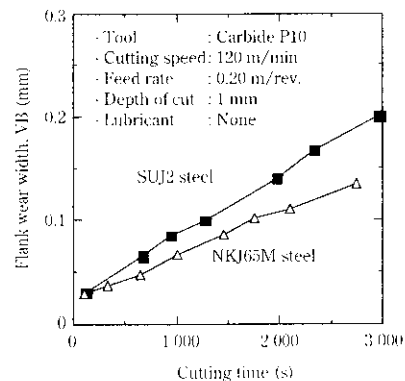


Fig. 10 Wear pattern of carbide tool in turning test

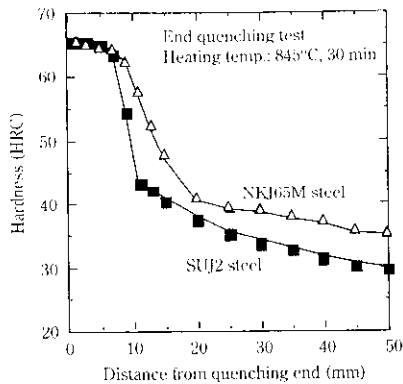


Fig. 11 Hardenability of developed steel

Table 3 Representative properties of developed steel after quenching and tempering heat treatment

Steel	Hardness (HRC)	Rolling contact fatigue B10 life* ( $\times 10^6$ cycles)
NKJ65M	61.0	1.64
SUJ2	62.1	1.56

\*Machine type: Radical  
Maximum contact stress: 5884 MPa  
Lubricant: Turbine oil #68

間変形能を有している。

Fig. 10 に外周旋削試験時の工具摩耗量の変化を示す。開発鋼は、SUJ2 鋼よりも工具摩耗量が小さく、切削加工性に優れている。

### 3.4 焼入れ焼もどし後の性能

Fig. 11 にジョミニー試験による焼入れ性能を示す。開発鋼は SUJ2 鋼と同等以上の焼入れ性を有している。

Table 3 に焼入れ焼もどし後の代表的な性能を示す。転動疲労寿命は、SUJ2 鋼よりもやや高い値を示しており、開発鋼は優れた転動疲労性能を有している。

## 4 結 言

川崎製鉄は JIS-SUJ2 鋼と同等以上の優れた転動疲労性能および二次加工性能を有する中炭素系軸受け鋼 NKJ65M 鋼を開発し、実用化した。

- (1) 共晶炭化物生成の予測手法を開発し、拡散焼鈍工程の省略が可能となる組成の予測が可能となった。
- (2) 転動疲労および二次加工性に及ぼす鋼組成の影響を明らかにし、さらに拡散焼鈍工程の省略が可能である鋼組成 (0.75 mass% C-0.55 mass% Si-1.1 mass% Mn-0.5 mass% Cr) を決定した。
- (3) 開発鋼には共晶炭化物が認められず、拡散焼鈍プロセスの省略が可能である。
- (4) 開発鋼は、セメントタイトの球状化率が SUJ2 鋼と同等であり、冷間加工性、切削性などの二次加工性に優れる。
- (5) 開発鋼は、SUJ2 鋼と同等以上の転動疲労性能を有する。

本開発鋼は既に実用化されており、これまでに種々の軸受け部品に適用されている。今後、さらにその優れたコストパフォーマンスを活かし、適用の拡大が期待される。

## 参 考 文 献

- 1) J. M. Beswick: *Metal. Trans. A*, **18A**(1987), 1897
- 2) 前田喜久男, 植村 博, 佐橋弘二: *NTN Technical Review*, (1996)5, 23-29
- 3) 天野慶一, 星野俊幸, 川端文丸: *川崎製鉄技報*, **31**(1999)1, 52-54
- 4) B. Jansson, M. Schalin, M. Selleby, and B. Sundman: *The Mat. Soc. of CIM, Quebec*, (1993), 57
- 5) 門間改三, 丸田良平, 山本俊郎, 門脇恵洋: *日本金属学会誌*, **32**(1968), 1193-1198
- 6) N. Kino, K. Otani, T. Yamaguchi, N. Uchiyama, and T. Kimura: *Proc. of the 19th ASM Heat Treating Soc. Conf., Cincinnati*, (1999), 535-542
- 7) 辻幸三郎, 岡本一生, 渡辺章三: *鉄と鋼*, **54**(1968), 1353
- 8) 山本俊郎: *日本金属学会報*, **11**(1972), 419
- 9) 坪田一: *鉄と鋼*, **68**(1982), 1046
- 10) 越智達郎, 大木光一, 蟹澤秀雄, 草野祥昌: *新日鐵技報*, (1999)370, 20-26
- 11) 星野俊幸, 天野慶一, 山本義治, 太田敦彦, 後藤特夫: *までりあ*, **37**(1998), 516-518
- 12) 安本聡, 星野俊幸, 天野慶一: *CAMP-ISIJ*, **5**(1992), 1961
- 13) 安本聡, 星野俊幸, 松崎明博, 天野慶一: *CAMP-ISIJ*, **6**(1993), 1763