



入門講座

身近な鉄-7

自動車の歯車用鋼 (SMnC、SCr、SCM)

住田 庸
Makoto Sumida

愛知製鋼(株) 技術本部部品開発部
主任担当員

Gear Materials for Automobile (SMnC、SCr、SCM)

1 はじめに

自動車は、エンジンより発生する回転トルクを適宜変速し、最終的に車軸に伝えることにより走行が可能となる。この回転トルクを変速伝達するためにトランスミッション（オートマチック、マニュアル）やデファレンシャル等の伝達機構が必要となる。これらの伝達機構は多くの歯車部品により構成されているが、歯車は大きな負荷を常に受けるため、極めて高い信頼性が要求される。

また、最近の自動車の技術開発において安全性、快適性、信頼性などの基本性能の維持向上に加えて、環境問題への対応が重要な課題となっている。特に自動車の燃費向上によるCO₂削減は、地球温暖化対策として必須であり、同時に省資源、省エネルギー対策としても重要な位置づけにある¹⁾。自動車の燃費向上に対しては軽量化が有効であるが、歯車に対しても例外ではなく、軽量化を目的とした歯車の高強度化技術の開発が必須となっている。

自動車の歯車に用いられる機械構造用鋼としてはSC、SMnC、SCr、SCM、SNCM等多くの種類があるが、図1に示すようにそのほとんどが、浸炭焼入処理、窒化・軟窒化処理、高周波焼入処理等の表面硬化処理が施されて使用されている。

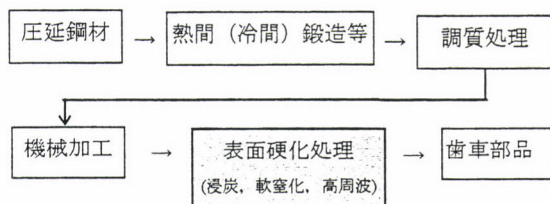


図1 自動車用歯車の代表的な製造工程

そこで本報では、自動車用歯車材料に対する理解を深めるために、表面硬化処理別に歯車部品に用いられる機械構造用鋼SMnC、SCr、SCMを中心に、昨今の歯車用鋼の開発動向を含めて紹介する。

2 歯車用鋼の種類

自動車用歯車は、図2に示すように歯面疲労強度や歯元曲げ疲労強度あるいは歯元衝撃強度が要求される。従って、歯車の内部に靱性をもたせ、表面層のみ硬化する表面硬化処理が施される。

表面硬化処理の種類には、表1に示すように浸炭焼入処理、窒化・軟窒化処理、高周波焼入処理等があり、これらの表面硬化処理は

浸炭処理 ……強度特性が優れる

窒化・軟窒化処理 ……熱処理歪が小さい

高周波焼入れ処理 ……コストが安く、作業環境性が良い
といった特徴により、使い分けられている。

従って、自動車の歯車用鋼は、表1に示すこれらの処理方法に適した機械構造用鋼が適用されるため、浸炭焼入用鋼、窒化・軟窒化用鋼（以下窒化用鋼と称する）、高周波焼入用鋼に大別される。

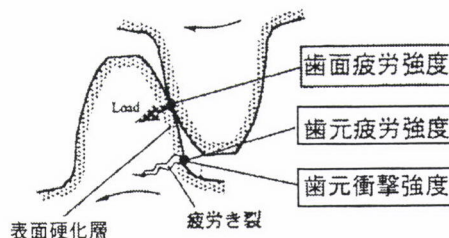


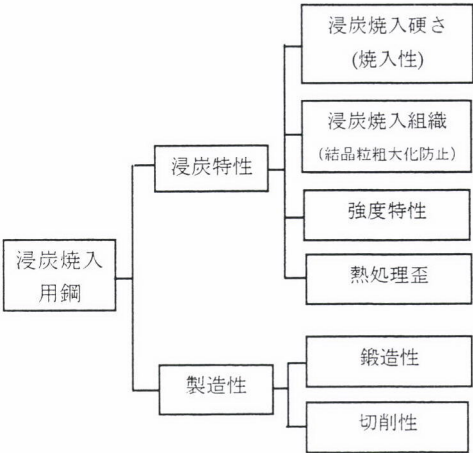
図2 自動車用歯車の破壊形態

表1 自動車用歯車に適用される主な表面硬化処理の特徴

種類	表面硬化処理方法の特徴	一般的な 処理温度	表面 硬さ	硬化 深さ	代表的な 適用鋼種
浸炭焼入処理	部品の表面よりCを侵入拡散させた後、全体焼入を施すことでマルテンサイト組織を得て、表層部に高い硬化層を形成する処理	920℃ ～ 980℃	Hv700 ～ Hv850	0.3mm ～ 1.5mm	SMnC420H SCr420H SCM420H
窒化・軟窒化 処理	部品の表面よりNを侵入拡散させ、表層部に窒化物を析出させることで硬化層を形成する処理	500℃ ～ 580℃	Hv600 ～ Hv1000	0.1mm ～ 0.5mm	SCM420 SCM435
高周波焼入処理	部品の表面層のみ加熱した後、焼入を施すことで表層部のみマルテンサイト組織を得て、表層部に硬化層を形成する処理	900℃ ～ 1000℃	Hv600 ～ Hv850	0.5mm ～ 10mm	S45C S48C S53C

表2 JIS規格に規定される代表的な焼入性を保証した機械構造用鋼（H鋼）

JIS 番号	鋼種記号	主成分 (%)	直径・13mm 位置の硬さ 規格 (HRC)
G4025	SMnC420H	0.20C-0.25Si-1.30Mn-0.50Cr	31以下
	SCr420H	0.20C-0.25Si-0.75Mn-1.00Cr	21～32
	SCM420H	0.20C-0.25Si-0.75Mn-1.00Cr-0.20Mo	24～37
	SNCM420H	0.20C-0.25Si-0.60Mn-1.80Ni-0.50Cr-0.20Mo	23～34



3 浸炭焼入用鋼

自動車用歯車において最も多く用いられている表面硬化処理は浸炭焼入であり、浸炭焼入用鋼（通称、肌焼鋼）は最も需要が高い歯車用鋼である。浸炭焼入用鋼に要求される主な特性を図3に示す。以下に各要求特性の詳細について説明する。

3.1 焼入性

浸炭焼入用鋼における素材焼入性は、歯車の強度特性に最も重要な浸炭焼入硬さへの影響が大きいため、浸炭焼入用鋼は通常焼入性を保証したH鋼が用いられる。表2にJIS規格に規定される代表的な浸炭用鋼である焼入性を保証した機械構造用鋼（H鋼）を示す。これらの機械構造用鋼の使い分けについては、主に歯車の質量に応じた焼入性をもつ浸炭焼入用鋼が適用される。図4にSMnC420H、SCr420H、SCM420Hにおける各種丸棒径での浸炭処理後の焼入硬さ特性の一例を示す。

3.2 結晶粒粗大化防止

浸炭焼入処理は、920℃以上の温度で長時間処理されるため、オーステナイト結晶粒の粗大化あるいは異常粒成長を招く場合がある（図5）。また、昨今のネットシェイプ化の

図3 浸炭焼入用鋼に要求される主な特性

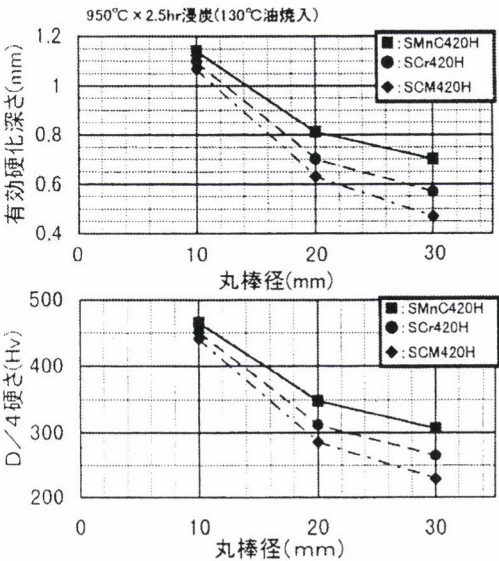


図4 SMnC420H、SCr420H、SCM420Hの浸炭硬さ特性

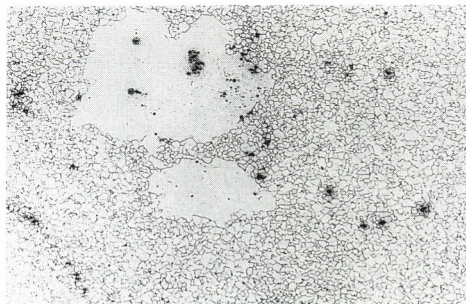


図5 浸炭焼入処理品に観察されるオーステナイト結晶粒の異常粒成長 (×100)

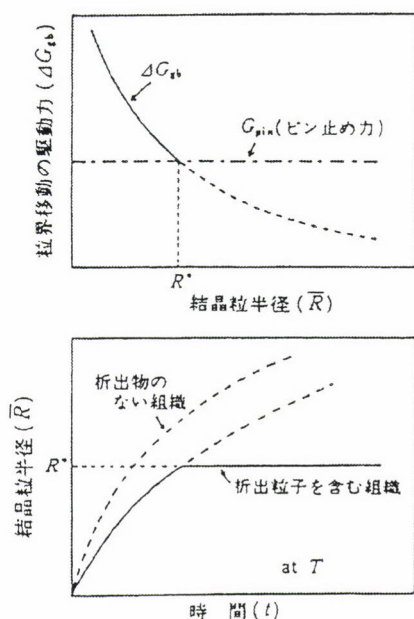


図6 析出物が存在する場合の結晶粒成長の様相³⁾

動きから冷間鍛造歯車が実用化されているが²⁾、強加工の冷間加工は浸炭初期のオーステナイト結晶粒を細かくし、結晶粒が局部的に粗大化する異常粒成長をより起こりやすくする。従って、結晶粒粗大化防止技術はますます重要な課題となっている。

結晶粒は、図6³⁾に示すように粒成長駆動力 (ΔG_{gb}) と粒成長抑制力 (G_{pin}) のバランスで保たれているため、そのバランスが崩れたときオーステナイト結晶粒の粗大化や異常粒成長が起こる。

浸炭時のオーステナイト結晶粒の成長駆動力は、主に浸炭前の組織の細かさや加工歪 (冷間鍛造等) 等の影響による浸炭初期のオーステナイト結晶粒径に依存し、浸炭時のオーステナイト結晶粒の成長抑制力は、Pinning粒子と称されるAlN、Nb(C、N)等の析出量や分布状態に依存する。

従って、浸炭用鋼はオーステナイト結晶粒粗大化防止のため通常Al、Nが添加されており、さらに冷間鍛造用途の

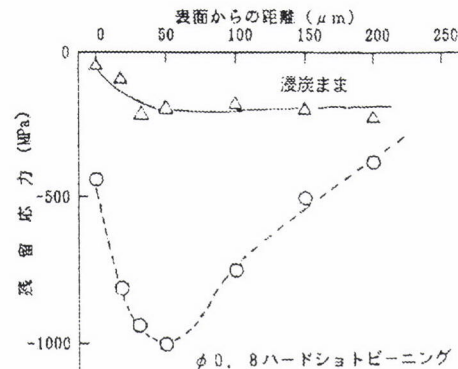


図7 ショットピーニングによる残留応力分布の変化

歯車等には微量Nb等の特殊元素と複合添加される場合もある⁴⁾。

3.3 強度

歯車強度は、使用環境や部品の種類等により歯面疲労強度、歯元疲労強度あるいは歯元衝撃強度が要求される。これらの強度には、適切な浸炭焼入硬さが得られる浸炭焼入用鋼を選定することが最も重要なことである。また、通常浸炭焼入れした部品の表面は10数 μm 程度の浸炭異常層が生成し、歯車強度に大きな影響を及ぼす。この浸炭異常層は、Si、Mn、Cr等の粒界酸化物と不完全焼入組織からなる領域で疲労強度低下原因となり^{5,6)}、また後述するショットピーニング後の表面粗さを悪化させる。従って、高い強度を要求される歯車には浸炭異常層の生成を抑制するため、酸化されにくく焼入性を向上させる元素MoあるいはNiが添加されたSCMあるいはSNCMが適用されることが多い。

また昨今、浸炭焼入歯車の強度向上にはこの浸炭異常層の低減が有効であることから、浸炭異常層の生成要因である内部酸化元素Si、MnおよびCr等を低減し、酸化されにくい元素であるNi、Moを添加あるいは増加させた高強度歯車用鋼が開発されている^{7,8,9)}。

一方、歯車の高強度化に対しては、ショットピーニングが極めて有効な手段であるため、その採用が増加している。ショットピーニングは歯車表面に直径0.1~1.2mm程度のショット粒 (鋼球やカットワイヤ) を投射する¹⁰⁾ことにより、図7に示すように浸炭表層部に高い圧縮残留応力を発生させて疲労強度の向上をはかるものである。上述の高強度歯車用鋼とショットピーニングを組み合わせることにより、さらに疲労強度を向上させることも可能となる^{8,9)}。

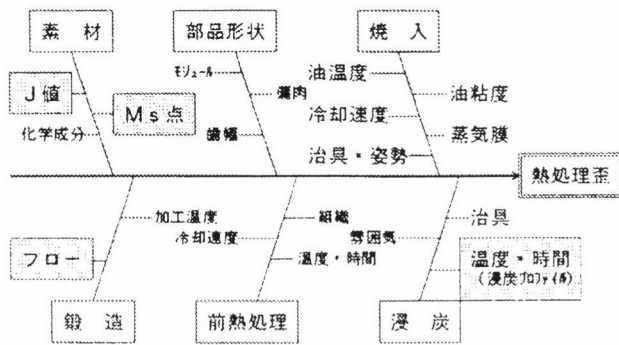


図8 浸炭焼入歪に及ぼす特性要因図

3.4 熱処理歪

浸炭時の歪は、歯車のノイズ増加あるいは歯面の片当たりによる部品強度の低下を招くため、歪低減に対して古くから多くの研究がなされてきている^{11~14)}。

材料面では、前述したジョミニ焼入性をJIS規格幅の1/2~1/4程度に管理し、かつ素材の均質性を上げることで浸炭焼入歪のばらつき低減に寄与してきた。

熱処理歪の低減は浸炭焼入歯車部品の大きな課題であるが、図8に示すように歪に寄与する要因は部品製造プロセス全体の多岐に渡っているため、その解決には多くの取り組みが必要である。最近では、歪に対してCAEシミュレーション技術を用いた研究^{15,16)}も盛んに行われているが素材から部品までの工程をスルーで見た開発が重要である。

3.5 製造性

歯車用鋼は、表面硬化処理後の熱処理歪や強度（歯面疲労強度、歯元疲労強度、歯元衝撃強度）等の熱処理特性の他にホブ加工性、ブローチ加工性等の切削性が要求される。また、自動車用歯車のほとんどが鍛造されるため、歯車用鋼の冷間鍛造性、温間鍛造性、熱間鍛造性等が重要な特性となる。図9にその一例として、冷間鍛造性に対するS、

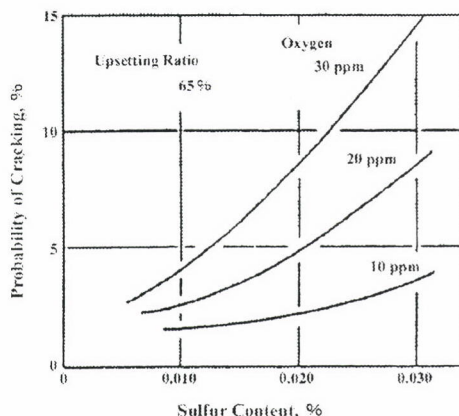
図9 アプセット時の割れ発生率に及ぼすS、Oの影響¹⁷⁾

表3 用途別に見た歯車用鋼の規格例（%）

用途	Si	S	O
JIS規格	0.15~0.35	0.030 以下	—
熱間鍛造用途	↑	0.010 以上	—
温間鍛造用途	↑	0.020 以下	0.0015 以下
冷間鍛造用途	0.15~0.25	0.020 以下	0.0015 以下
	↑	0.010 以下	0.0012 以下

Oの影響を示す¹⁷⁾が、その影響が大きいことがわかる。従って、表3に示すように自動車の歯車用鋼は、鍛造の用途別に特定成分を管理される場合が多い。

3.6 今後の課題

浸炭焼入用鋼の今後の課題としてショットピーニングの採用により歯元疲労強度は大幅に向上したが、歯面疲労によるピッチング破壊が課題となっている。加えて歯車の静粛性向上に対し、浸炭焼入歪の低歪化が従来にまして重要な課題となってきている。これらの課題解決には、コストを追求する中では素材から部品までの工程をスルーで見た開発がますます重要になると予測される。

4 窒化用鋼

軟窒化処理・窒化処理は、600℃以下の比較的低温でCr、Al等の窒化物を析出させる表面硬化処理であるため、浸炭焼入処理や高周波焼入処理等のマルテンサイト変態を利用した表面硬化処理と比べて熱処理歪みが小さいと言った利点がある。従って、熱処理歪を嫌う静粛性重視の歯車に適用される^{18,19)}。図10に高周波焼入処理品と軟窒化処理品の精度比較を示す²⁰⁾が、軟窒化処理品は熱処理前後の寸法ばらつきがほとんど変化しないことがわかる。

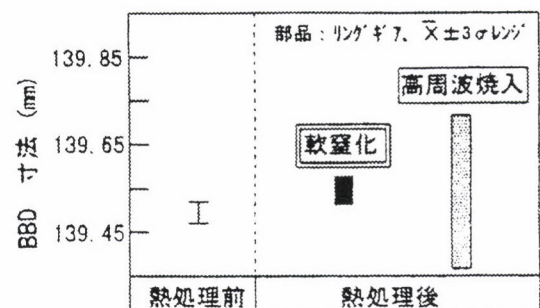
図10 軟窒化処理と高周波焼入処理の精度比較²⁰⁾

表4 JIS規格に規定される窒化用鋼

鋼種番号	鋼種記号	成分系(%)
G4202	SACM645	0.20C-0.25Si-0.50Mn-1.50Cr -0.20Mo-1.00Al

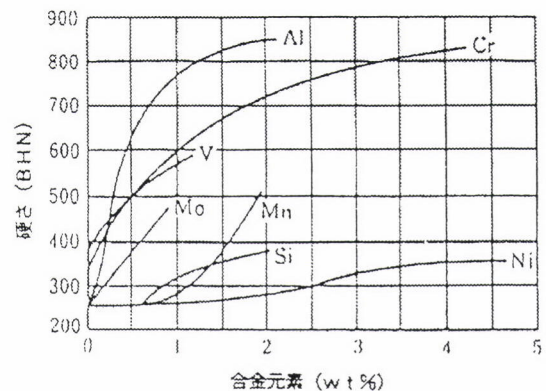
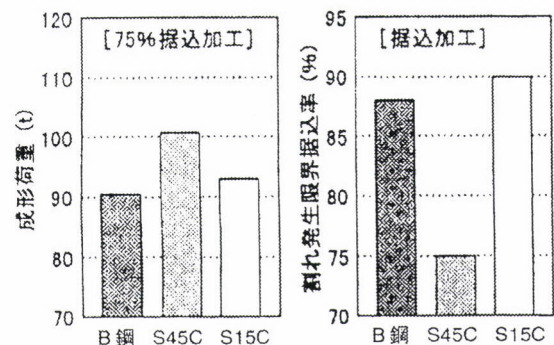
窒化用鋼は、JISではSACM645が規定されている代表的な窒化用の機械構造用鋼（表4）であるが、自動車用窒化歯車にはほとんど適用されていなく、JIS SCrあるいはSCMを焼入れ焼戻し後に軟窒化・窒化処理されて歯車に供試されている。図11²¹⁾に示されるようにAl、V等は大幅に窒化硬さを向上させることから、最近では窒化歯車の軟窒化熱処理品質を向上させるため、SCr、SCMにAl、V等を添加した高強度窒化用鋼が開発され適用されている^{18,22)}。

一方、窒化歯車は、強度（特に歯面疲労強度）が浸炭歯車に比較して低い。これは、主に浸炭歯車に比較して硬化深さが浅いあるいは内部の硬さが低いためであり、適用できる歯車に制限があるのが現状である。今後、軟窒化・窒化歯車の適用拡大には、短時間の軟窒化・窒化処理で浸炭並みの硬化深さが得られる窒化用鋼の開発が必要と考えられる。

5 高周波焼入用鋼

自動車用歯車に使用される高周波焼入用鋼は、主にS45C、S48C、S53C等の炭素含有量の多い機械構造用炭素鋼が適用されている。従って、高周波焼入用鋼は炭素含有量の低い浸炭焼入用鋼に比べ、冷間鍛造等の加工性が劣る傾向にある。最近では歯車部品のネットシェイプ化に対する熱冷複合鍛造化あるいは冷間鍛造化に対する塑性加工性を追求するため、炭素鋼にBを添加した高周波焼入用鋼の開発がされている²³⁾。Bは0.0005～0.0030%程度の微量添加で冷間変形抵抗を増加させずに焼入性を大きく向上させる元素であるため、変形抵抗を増加させるSi、Mn等の元素を低減させ、B添加により焼入性を確保することにより、図12²³⁾に示すように冷間変形抵抗を低減することが可能となる。

高周波焼入処理は自動車部品への適用例は古くまた多くの部品に適用されているが、自動車用歯車に限ればその適用例はそれほど多くはない。しかし、高周波焼入処理はクリーンでインライン処理が可能であるうえに特に最近では2周波を利用した高周波焼入（輪郭焼入）処理が開発され、従来にない熱処理歪と強度特性が報告されている^{24,25)}。今後、適用が期待される表面硬化処理技術であり、材料側からのアプローチも期待される。

図11 窒化最高硬さに及ぼす合金元素の影響²¹⁾図12 B添加型高周波焼入用鋼の冷間鍛造性²³⁾

6 おわりに

以上、自動車の歯車用鋼を各種表面硬化処理から分類して、その特徴を述べてきた。

今後の自動車部品における歯車用鋼は歯車強度の向上だけでなく、コスト（ニアネットシェイプ化）あるいは熱処理時間短縮やドライ切削等、製造時の環境対応への要求もさらに強くなると予想され、歯車用鋼に要求される特性も変わってくることが予想される。

今後さらに、歯車用鋼は材料～塑性加工～機械加工～表面硬化処理～部品機能をスルーで見た技術開発が今後ますます重要になると考えられる。

参考文献

- 1) 竹内雅彦：塑性と加工，39（1998）450，664.
- 2) 第24回鍛造実務講座 鍛造と他の加工法との複合化による高精度化と低コスト化，日本塑性加工学会，（1991），91.
- 3) 牧 正志：第161・162回西山記念技術講座，鉄鋼の組織制御の原理と応用，日本鉄鋼協会編，（1996）
- 4) 紅林 豊，中村貞行：電気製鋼，65（1994），67.

- 5) 並木邦夫, 杉浦三郎, 梅垣俊造, 岡田義夫, 谷意公夫 : 電気製鋼, 61 (1990), 5.
- 6) 蟹澤秀雄, 越智達郎, 子安善朗 : 新日鉄技報, 354 (1994), 43.
- 7) 割田俊明 : 特殊鋼, 44 (1995) 3, 42.
- 8) 鎌田芳彦 : 特殊鋼, 44 (1995) 3, 43.
- 9) 田村譲児 : 特殊鋼, 44 (1995) 3, 44.
- 10) 浜坂直治 : 熱処理, 39 (1999) 5, 264.
- 11) 百生 孝 : 熱処理, 5 (1965) 3, 201.
- 12) 割石官市 : 熱処理, 8 (1968) 4, 233.
- 13) 宮川直久 : 熱処理, 8 (1968) 4, 240.
- 14) 鋼の焼歪 (Q. D.) 研究部会発表会, 日本熱処理技術協会, (1992)
- 15) 井上達雄 : 熱処理, 23 (1983) 5, 271.
- 16) 岡村一男 : 熱処理, 33 (1993) 4, 221.
- 17) 五十川幸弘 : 第49回塑性加工学講座 鍛造加工の基礎と応用, 日本塑性加工学会, (1991), 91.
- 18) 三輪能久, 柴田伸也, 花川勝則, 生野祐治 : 自動車技術会学術講演前刷集, 892 (1989), 395.
- 19) 坪井治道, 岬柳明弘, 土方 誠, 左用正一, 浜島徹朗 : 自動車技術会学術講演前刷集, 982 (1998), 139.
- 20) 相原秀雄, 犬塚昌彦 : 熱処理, 38 (1998) 5, 246.
- 21) 今井勇之進 : 鉄鋼材料 (金属工学講座), 42
- 22) 小林一博, 細田賢一, 坪田一一, 有見幸夫, 山岡孝 : 山陽特殊鋼技報, 1 (1994) 1, 19.
- 23) 村中 寛, 酒井宏明 : 特殊鋼, 48 (1999) 1, 33.
- 24) 古賀久喜, 川崎一博, 山崎隆雄 : 熱処理, 39 (1999) 3, 142.
- 25) 川崎一博, 三阪佳孝, 清澤 裕, 山崎隆雄 : 熱処理, 39 (1999) 5, 257.

(2000年5月2日受付)