

連携記事

オートバイのブレーキディスク用 高耐熱マルテンサイト系ステンレス鋼

Martensitic Stainless Steel with Excellent Heat Resistance
for Motorcycle Brake Discs

藤澤光幸 JFEスチール(株)
Mitsuyuki Fujisawa スチール研究所 ステンレス鋼研究部
主任研究員

1 はじめに

オートバイのディスクブレーキは、車輪と連動して回転するローター部の両面を、パッドで締め付け、ローター部とパッドの間に働く摩擦力によって、車輪の回転速度を減少し、車両を減速する機構である。ローター部は柔らかすぎると摩耗が大きくなり、一方、硬すぎるとブレーキ鳴きが発生することから、一定の硬さが求められる。一般的にその値はロックウェル硬さで32~38HRC程度である。また、オートバイではブレーキディスクが外部から見えるため意匠性も重要であり、耐食性に優れた材料が求められる。このような要求を満足するブレーキディスクの材料として、12~13%のクロムを含有するマルテンサイト系ステンレス鋼の熱延鋼板が使用されている。

オートバイのブレーキディスク材として、1980年代以前には、SUS420J1 (13% Cr-0.2% C鋼) やSUS420J2 (13% Cr-0.3% C鋼) といった、比較的、炭素含有量の高いマルテンサイト系ステンレス鋼が主に使われていた。ローター部に必要な硬さを得るため、焼入れにより鋼を硬化するが、これらの鋼種では、焼入れ温度の増減により焼入れ後の硬さが大きく変化するため、焼入れで必要な硬さを安定して得ることが困難であった。このため、硬さ調整のための焼戻しが必要であり、製造工程が煩雑であった。また、焼戻し時におけるクロム炭化物の析出により、クロム炭化物の周囲にクロム欠乏層が形成されるため、耐食性の低下が問題であった。1980年代に、広い温度範囲の焼入れで、要求硬さを安定して得ることができる、ブレーキディスク用の低炭素マルテンサイト系ステンレス鋼 (12% Cr-1.5% Mn-0.05% C鋼) が開発された¹⁾。本材料は硬さ調整のための焼戻し工程が不要であり、耐食性

にも優れている。このような焼戻し不要の低炭素マルテンサイト系ステンレス鋼は、1980年代以降、現在に至るまで、主流なブレーキディスク材として広く使用されている^{1,2)}。

最近の技術的ニーズとしてブレーキディスク材の耐熱性の向上があげられる。近年、スポーツタイプのオートバイや中型、大型オートバイの走行性能向上が進み、同時にブレーキの信頼性向上が求められている。このような種類のオートバイでは制動発熱が大きいいため、ブレーキディスクはより高温に昇温されやすい。また、ブレーキディスクの軽量化やデザイン性の目的から、薄肉化、小型化のニーズもある。この場合、ブレーキディスクの熱容量が低下するので、やはり、ブレーキディスクは、より高温に昇温されやすくなる。昇温により、マルテンサイトが軟化する温度を超えると、ローター部の摩耗量の増加や、ブレーキディスクの反りなどの形状変化が発生するため、満足なブレーキ性能が得られなくなる。このような背景から、従来材よりも高温に加熱されても軟化しない、焼戻し軟化抵抗の高い材料が求められている。

高耐熱化の要求に応える鋼として、焼戻し過程における鋼中の炭化物および窒化物の析出形態を制御することにより、従来鋼に比べてマルテンサイトの焼戻し軟化抵抗を向上した高耐熱鋼が開発された^{3,4)}。本報では、開発鋼における焼戻し軟化抵抗の向上技術と、開発鋼の特性について説明する。

2 従来のブレーキディスク材の特徴

現在、広く使用されている12% Cr-1.5% Mn-0.05% C鋼の焼入れ後の硬さにおよぼす焼入れ温度の影響を図1に示す¹⁾。比較として旧来使用されていたSUS420J1のデータもあわせて示す。12% Cr-1.5% Mn-0.05% C鋼の特徴は、SUS420J1よ

りも炭素含有量を低減することにより、焼入れ後のマルテンサイトの硬さを適正な値に調整していることと、炭素含有量の低減によって減少したオーステナイト生成能をマンガンの添加で補い、焼入れ後にほぼ100%のマルテンサイト組織となるようにしていることである。12% Cr-1.5% Mn-0.05% C鋼はSUS420J1に比べて適正な硬さを示す焼入れ温度範囲が広く、焼入れにより必要な硬さが安定して得られる。このような焼戻しが不要な低炭素マルテンサイト系ステンレス鋼が、旧来の焼戻しを必要とする高炭素マルテンサイト系ステンレス鋼に代わりブレーキディスク材の主流になった。一方、焼入れした12% Cr-1.5% Mn-0.05% C鋼において、高温での軟化によって、適正な硬さ範囲を下回らない上限温度は500℃ (1h加熱の場合) に留まっており、近年、より高い焼戻し軟化抵抗を有する鋼が望まれていた。

3 高耐熱ブレーキディスク材の検討

3.1 成分設計指針

マルテンサイトの焼戻し過程では、炭化物や窒化物の析出による固溶炭素量や固溶窒素量の減少、および転位の回復により硬さが低下する^{5,6)}。したがって、焼戻し軟化抵抗を向上

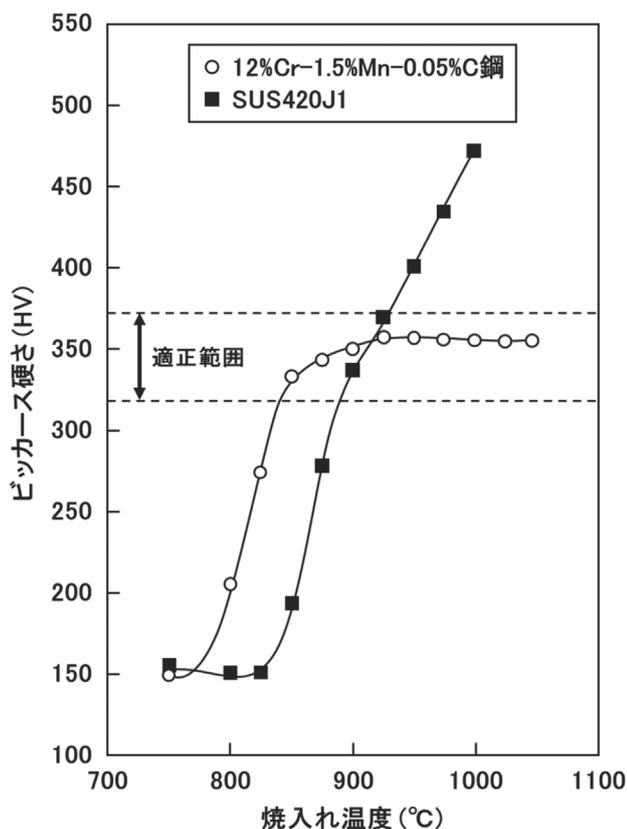


図1 12% Cr-1.5% Mn-0.05% C鋼およびSUS420J1の焼入れ後の硬さにおよぼす焼入れ温度の影響¹⁾

するためには、焼戻し過程における炭化物および窒化物の析出を遅延させ、固溶炭素量および固溶窒素量の減少を抑制することや、焼戻し過程で析出する炭化物および窒化物を微細化し、これらの析出物を硬さの維持に活用することが有効と考えられる。焼戻し過程における炭化物および窒化物の制御によるマルテンサイトの焼戻し軟化抵抗の向上を目的として、高窒素化およびニオブ添加されたマルテンサイト系ステンレス鋼の実験室的検討が行われている^{3,4)}。

3.2 焼戻し軟化挙動におよぼす窒素およびニオブの影響

表1の成分を含有する4種の実験鋼について、焼戻し軟化挙動を調査した結果を図2に示す⁴⁾。これらの実験鋼は、12% Cr-1.5% Mn-0.05% C鋼をベース鋼として、高窒素化およびニオブ添加をした鋼である。板厚6mmの実験鋼板について、1000℃で10min保持後空冷の焼入れを行ないマルテンサイト組織にした後、500~600℃で1h保持後空冷の焼戻しを行ない、ロックウェル硬さを測定した結果である。焼戻し前の硬さはいずれの鋼も35HRCであり同等である。500℃以上の焼戻しにより、いずれの鋼も焼戻し温度の増加にともな

表1 実験鋼の化学成分 (mass%)⁴⁾

鋼	C	Si	Mn	Cr	N	Nb
ベース鋼	0.052	0.31	1.54	12.3	0.007	-
高窒素鋼	0.030	0.31	1.59	12.3	0.043	-
ニオブ添加鋼	0.079	0.29	1.58	12.4	0.010	0.15
高窒素ニオブ添加鋼	0.049	0.30	1.57	12.2	0.042	0.15

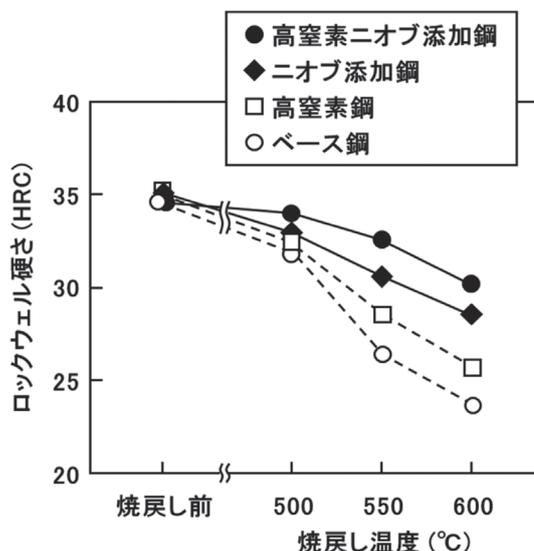


図2 焼戻し軟化挙動におよぼす高窒素化およびニオブ添加の影響⁴⁾

い軟化するが、ベース鋼に比べて、高窒素鋼、ニオブ添加鋼、続いて高窒素ニオブ添加鋼の順で、より軟化が抑えられていることがわかる。とくに550℃以上での、窒素およびニオブによる軟化抑制効果は著しい。以上のように、高窒素化およびニオブ添加はそれぞれ焼戻し軟化抵抗の向上に寄与し、複合して添加した場合はさらに焼戻し軟化抵抗が向上する。

1000℃で焼入れ後、550℃で焼戻しを行ったベース鋼、高窒素鋼およびニオブ添加鋼の透過電子顕微鏡像を図3に示す⁴⁾。ベース鋼では、析出物のほとんどが $M_{23}C_6$ であり、旧オーステナイト粒界に粗大に析出しているものが多い。一方、高窒素鋼では、ベース鋼に観察された $M_{23}C_6$ よりはるかに微細な、幅数nm、長さ数10nmの $Cr_2(C,N)$ が粒内に多数観察される。高窒素鋼では、焼戻し過程で析出する微細な Cr_2

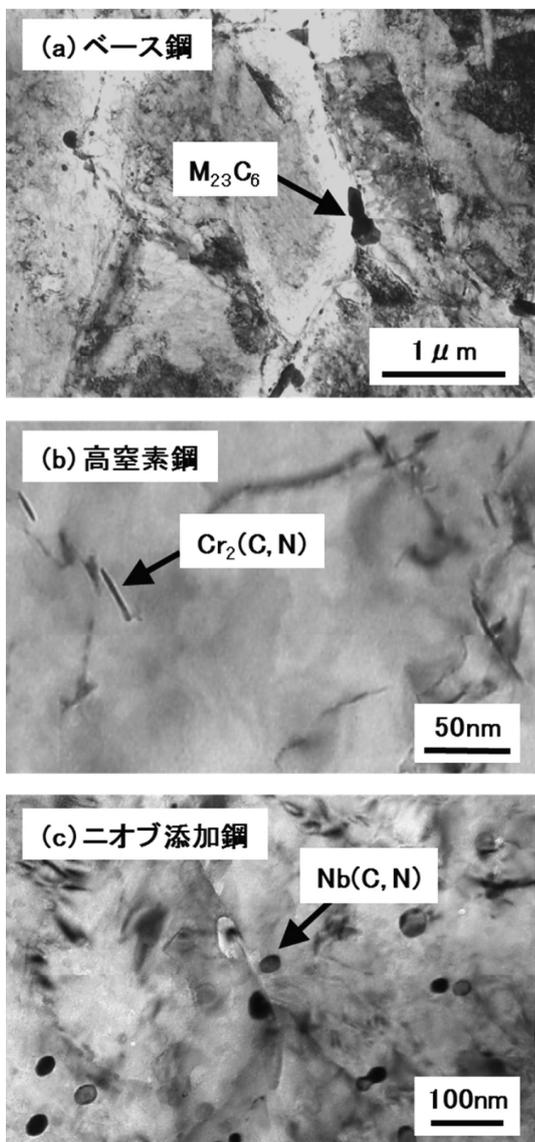


図3 (a) ベース鋼、(b) 高窒素鋼および (c) ニオブ添加鋼の550℃、1h焼戻し後の電子顕微鏡像^{3,4)}

(C,N)の強化作用により、焼戻し軟化抵抗が向上することが考えられる。また、ニオブ添加鋼では、直径20~30nmの微細なNb(C,N)が粒内に多数観察される。これらのNb(C,N)は焼入れ直後から存在しており⁴⁾、焼戻し過程でも微細な析出状態を維持することにより、焼戻し軟化抵抗が向上することが考えられる。

図4に、550℃で焼戻しを行った、高窒素ニオブ添加鋼とベース鋼について、電界抽出物分析により、炭素および窒素の析出量と固溶量を求めた結果を示す⁴⁾。高窒素ニオブ添加鋼では、上述した高窒素化とニオブ添加の効果がともにあらわれているものと考えられる。ベース鋼に比べて、 $M_{23}C_6$ の析出量は少なく、その一方、 $Cr_2(C,N)$ およびNb(C,N)の析出量や、固溶(C+N)量は多いことがわかる。したがって、高窒素化とニオブ添加を同時に行った場合、焼戻し過程において、微細な $Cr_2(C,N)$ の析出、微細なNb(C,N)の形態維持、および固溶(C+N)量の維持といった複合的な効果により、焼戻し軟化抵抗が著しく向上するものと考えられる。

4 窒素およびニオブを活用した高耐熱マルテンサイト系ステンレス鋼（開発鋼）の特性

4.1 化学成分

上述した焼戻し軟化抵抗の向上に関する検討に加え、耐食性や製造性なども含めた検討が行われ、高窒素化とニオブ添加を特徴とした高耐熱マルテンサイト系ステンレス鋼（12% Cr-1.5% Mn-0.05% C-0.04% N-0.13% Nb鋼）が開発された。

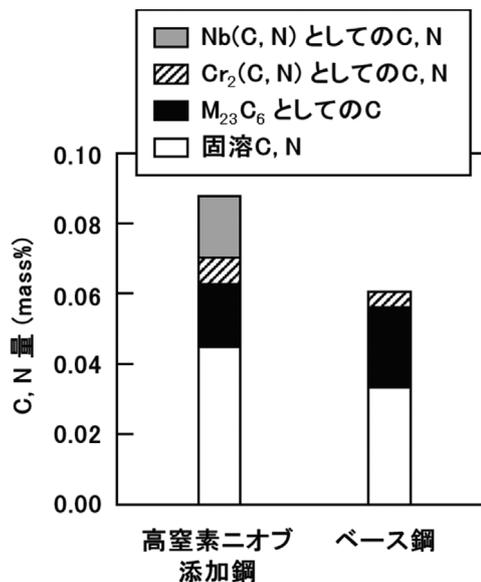


図4 550℃、1h焼戻し後の炭素(C)および窒素(N)の析出量と固溶量⁴⁾

表2 開発鋼および従来鋼の化学成分 (mass%)³⁾

鋼	C	Si	Mn	Cr	N	Nb
開発鋼	0.05	0.3	1.5	12.3	0.04	0.13
従来鋼	0.05	0.3	1.5	12.3	0.01	-

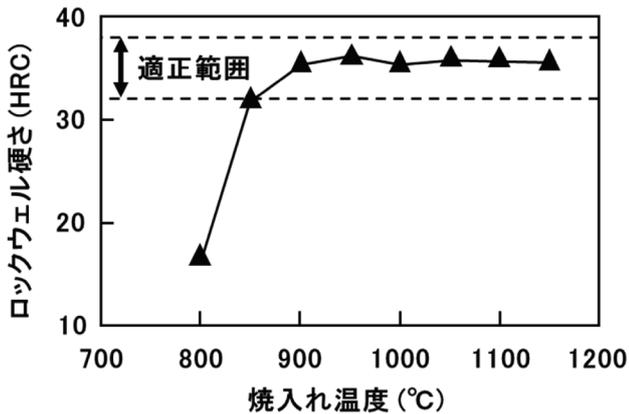


図5 開発鋼の焼入れ後の硬さにおよぼす焼入れ温度の影響⁴⁾

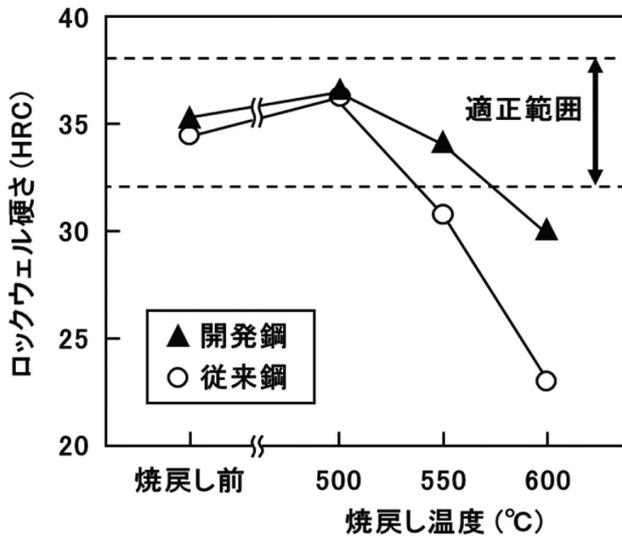


図6 開発鋼および従来鋼の焼戻し後の硬さにおよぼす焼戻し温度の影響 (各温度で1h焼戻し)³⁾

開発鋼の主成分を従来の12% Cr-1.5% Mn-0.05% C鋼とあわせて表2に示す³⁾。以下、開発鋼の特性を示す。

4.2 焼入れ後の硬さにおよぼす焼入れ温度の影響

開発鋼の焼入れ後の硬さにおよぼす焼入れ温度の影響を図5に示す⁴⁾。焼入れは各温度で10min保持後、空冷の条件で行ったものである。開発鋼は900~1150°Cの広い加熱温度の

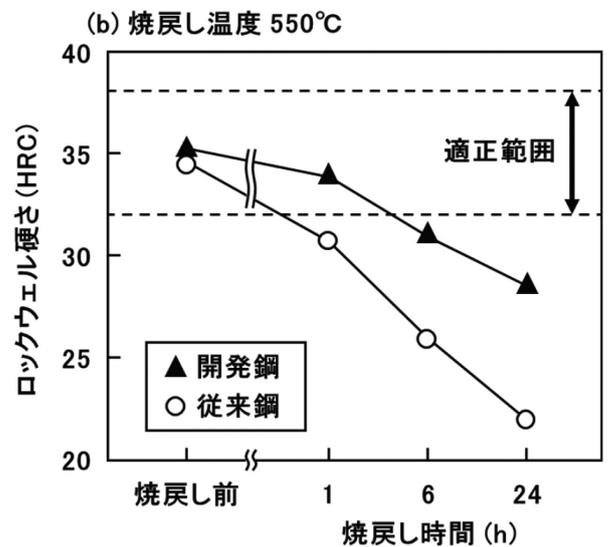
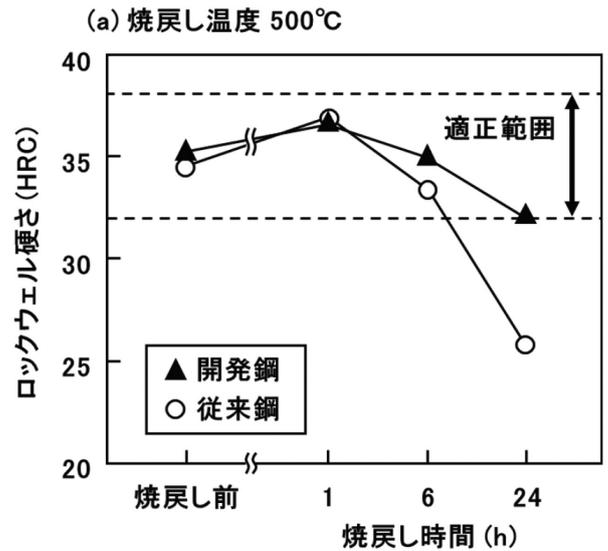


図7 開発鋼および従来鋼の焼戻し後の硬さにおよぼす焼戻し時間の影響: (a) 焼戻し温度500°C, (b) 焼戻し温度550°C⁴⁾

範囲で、ロックウェル硬さ32~38HRCの硬さを満足しており、焼入れによって適正範囲の硬さが安定して得られることがわかる。

4.3 焼戻し軟化挙動

1000°Cで10min保持後、空冷の条件で焼入れを行った試料の焼戻し軟化挙動を図6および図7に示す。図6は開発鋼および従来鋼の硬さにおよぼす焼戻し温度の影響である³⁾。開発鋼は従来鋼に比べて、550°C以上での焼戻し温度の増加にともなう硬さの低下が小さく、550°Cの焼戻し後においても、ブレーキディスクとしての適正な硬さを維持する。また、図7は硬さにおよぼす焼戻し時間の影響である⁴⁾。焼戻し温度が500°Cおよび550°Cのいずれの場合でも、開発鋼は従来鋼に比べて、焼戻し時間の増加にともなう硬さの低下が小さ

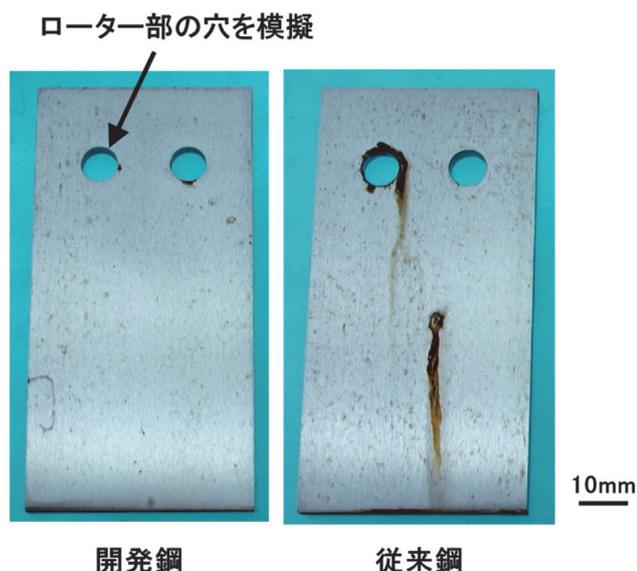


図8 開発鋼および従来鋼の耐食性 (塩水噴霧試験, 5% NaCl, 35°C, 96h)³⁾

く、適正な硬さを維持できる時間が大幅に長い。

4.4 耐食性

JIS Z 2371 (5% NaCl, 35°C) 準拠の塩水噴霧試験96h実施後の外観を図8に示す³⁾。これらの試験片にはあらかじめローター部の穴 (冷却や摩耗屑排出が目的) を模した8mmφの穴が穿孔されており、試験前の試験片の表面粗さRaは1.0μm程度 (#240研磨仕上げ) である。図8より、開発鋼には穴の縁に多少の発錆が認められるものの、従来鋼に比べて発錆の程度は軽微であり耐食性に優れることがわかる。開発鋼では、固溶窒素量の増加が耐食性に寄与したことが考えられる⁷⁾。

5 おわりに

高窒素化とニオブ添加を特徴とした開発鋼は、従来鋼に比べて焼戻し軟化抵抗が高く、耐熱寿命に優れている。焼戻し過程における、微細なCr₂(C,N)の析出、微細なNb(C,N)の形態維持、および固溶(C+N)量の維持といった複合的な効果によるものである。開発鋼は、オートバイの高性能化にともなう、ローター部の摩耗やブレーキディスクの反りなどのブレーキ性能に関わる問題の改善に寄与するものと期待される。また、ブレーキディスクの薄肉化、小型化にも寄与するものと考えられる。開発鋼は耐食性も優れており、オートバイのブレーキディスク材として最適な特性を有している。

参考文献

- 1) 吉岡啓一, 鈴木重治, 石田文良, 堀内雅義, 小林真: 川崎製鉄技報, 15 (1983) 4, 266.
- 2) 西村正博, 佐藤隆策, 飯泉省三: 日新製鋼技報, 50 (1984), 84.
- 3) 平澤淳一郎, 尾崎芳宏, 宇城工, 古君修, 笠茂利広: まてりあ, 43 (2004), 238.
- 4) 山内克久, 尾崎芳宏, 宇城工: JFE技報, 20 (2008) 6, 47.
- 5) F.B.Pickering: ISI Publication 114, (1968), 131.
- 6) T.Masumoto, S.Takeda and Y.Imai: Sc.Rep.Tohoku Univ., 22 (1970), 34.
- 7) K.Osozawa, N.Okato, Y.Fukase and K.Yokota: Boshoku Gijutsu, 24 (1975), 1.

(2018年8月3日受付)