

析出硬化型ステンレス鋼の被削性その他諸特性に及ぼすS, Ti添加の影響

中間 一夫*1・春名 靖志*2

Effect of Sulfur and Titanium Addition on Machinability and Other Properties of PH Stainless Steel.
Kazuo Nakama and Yasushi Haruna

Synopsis: Martensitic PH stainless steel SUS630 has poor machinability because of its high hardness and high toughness in solution treated condition. In this paper, the effect of sulfur and titanium addition to SUS630Mod. (modified SUS630 steel by lowering carbon content to soften in solution treated condition) on their properties, especially machinability, was investigated. The increase of sulfur content up to 0.02 mass% did not show remarkable improvement of machinability. When titanium, however, was added enough with sulfur to these grades, drill life was elongated by two or four times compared with titanium-free grades and turning tool wear was reduced. Non-metallic inclusions generating in both sulfur and titanium bearing grades were mainly niobium-titanium-sulfides, which apparently differed from manganese sulfides or niobium carbides ordinarily observed in titanium-free grades. Those inclusions adhered to cutting tool edge resulting in decrease of tool wear. Titanium addition up to 0.07 mass% did not deteriorate mechanical property, corrosion resistance and fatigue strength compared with titanium-free grade containing the same level of sulfur.

key words: stainless steel; precipitation hardening; SUS630; sulfur; titanium; niobium; sulfide; machinability; hardness; toughness; corrosion resistance; fatigue strength.

1. 緒言

マルテンサイト系析出硬化型ステンレス鋼である SUS630 (0.05%C-4%Ni-16%Cr-3%Cu-0.3%Nb) は、強度、韌性が高く、耐食性に優れるため、耐海水用シャフト、バルブ、ボルト、および耐食性が要求とされるプラスチック成型、化繊ノズル等に用いられている。これらの部品は、通常、固溶化熱処理（以下STと略す）状態で加工された後に、470~630℃の析出硬化熱処理により45~30HRCの硬さに調整して使用される。

約4%Niを含有するSUS630は、拡散変態に長時間を要するため¹⁾、工業的に完全焼なましは難しく、また析出硬化熱処理で所定の硬さを得るためには、Cuを過飽和に含有したマルテンサイト相である必要があることから、ST状態で素材供給され二次加工に供されることが多い。しかしながら、SUS630はST状態でも硬さが32~35HRCと高く、特に切削加工に関しては、高硬さと高靱性を併せ持つ材質的特性のため、切削速度が上げられず工具寿命が短いという問題点があった。硬さ低下の面から難削性を解消する手段として、C低減によりST状態のマルテンサイト相の硬さを低くする方法が知られており^{2), 3), 4)}、低C化したSUS630改良鋼が実用化されている。しかしながら、低C

化により、ST状態の靱性が上昇するため切削抵抗が増し、これだけでは被削性改善に十分な効果が発揮されているとはいえない。

また、SUS630系鋼の被削性を改善する方法の一つとして、H1150+H1150処理やH1150-M処理のような過時効処理が知られている⁵⁾。ただし、この方法では、加工製品を析出硬化させるためには再度高温でSTを行う必要があり、工程の煩雑さや熱処理歪みの点で、本鋼種の長所が減殺されている。

他方、合金元素添加の面から被削性を改善する手段も検討されている。Sは鋼中に添加されるとMnSなどの介在物を生成し、応力集中効果により切削抵抗の低減や切屑断断性の向上などの優れた被削性改善効果を有する元素であり、析出硬化型ステンレス鋼においてもこれを利用する方法が提案されている^{2), 6)}。この手法は、介在物の増加に伴う耐食性や靱性などの低下が予想されるものの、求められる特性と被削性のバランスを考慮して添加量を調整すれば、有力な手段の一つであるといえる。また、Tiは、SやCとの共存下で介在物形態を変化させ、耐食性向上に効果があることが知られており^{7), 8)}、析出硬化型ステンレス鋼に適用した場合に被削性と耐食性の調和的な特性向上を期待できる元素である。

*1 研究・開発センター 高合金鋼グループ

*2 研究・開発センター 高合金鋼グループ長、工博

そこで、本研究では、析出硬化型ステンレス鋼の被削性改善を目的として、低C化したSUS630改良鋼をベースに、S, Tiを添加したときの被削性に及ぼす影響を検討するとともに、強度、靱性、耐食性および疲労強度に与える影響について調査を行った。

2. 実験方法

本研究で用いた供試材化学成分範囲をTable1に示す。ST硬さを低下させるため低C化したうえで、耐食性向上のためにMoを添加したSUS630Mod. (0.01%C-6%Ni-16%Cr-1%Mo-3%Cu-0.3%Nb) をベースとして、S, Tiの添加量を種々変化させた真空誘導炉溶解材を用いた。

Table1. Chemical composition range of materials used for this experiment.

mass%									
C	Si	Mn	S	Ni	Cr	Mo	Cu	Nb	Ti
0.01	0.3	0.3	0.003	6	16	1	3	0.3	tr
			~						~
			0.043						0.157

実験手順の概要をFig.1に示す。真空誘導炉で溶製した上記組成の100kg鋼塊を各寸法に鍛伸し、所定の熱処理を施した後に、各種試験片に加工し試験に供した。被削性は、ドリル寿命試験（試験片：角35mm鍛伸-ST材）と旋削工具摩耗試験（試験片：直径45mm鍛伸-ST材）により評価した。それぞれの試験条件をTable2, 3に示す。非金属介在物の調査には、直径20mm鍛伸-ST材を用い、長手方向断面の形態を観察した。また、同一試料から透過型電子顕微鏡（TEM）用の抽出レプリカ試料を作製し、介在物の電子線回折に供した。その他、硬さ測定、シャルピー衝撃試験、耐食性試験および回転曲げ疲労試験は、ST後、各種析出硬化熱処理を施して試験に供した。耐食性試験条件をTable4に示す。

3. 実験結果および考察

3・1 介在物形態・マイクロ組織

直径20mmに鍛伸した供試材の長手方向に平行な断面について、介在物形態を観察した。Fig.2に、S単独添加またはS, Ti複合添加したSUS630Mod.について、介在物形態とその組成をEDXにて分析した例を示す。0.016%Sを単独添加した場合、生成した介在物は、鍛伸方向に塑性変形した線状の形状で、その組成は若干のCrを含有したMnSであった。一方、0.021%S-0.072%Tiを複合添加した場合に生成した介在物は、わずかに塑性変形を伴った紡錘～球状を呈しており、その組成はNb-Ti-Sであった。

Nb-Ti-S系介在物を詳細に調べるため、TEMによる電子

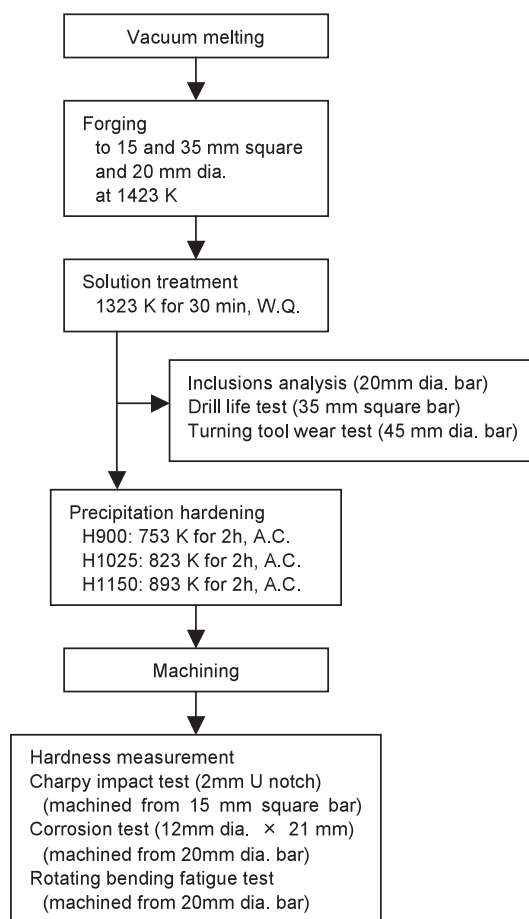


Fig.1 Specimen preparation.

Table2. Test condition for drill life test.

Tool	SKH51, 5mm dia.
Cutting speed	15, 20 m/min
Feed rate	0.03 mm/rev
Depth of hole	15 mm
Lubricant	None (Dry)

Table3. Test condition for turning tool wear test.

Tool	Carbide (P20), 0.4R
Cutting speed	100 m/min
Depth of cut	1.0mm
Feed rate	0.2 mm/rev
Lubricant	None (Dry)

Table4. Test condition for corrosion test.

Specimen dimension	12 mm dia. x 21 mm
Corrosive solution	6% ferric chloride
Temperature	298 K
Time	24 h

線回折を行った。Fig.3に、電子線回折パターンの例を示す。同一介在物について角度を変えて得られた複数の回折パターンから、今回観察されたNb-Ti-S系介在物は、 Nb_3S_6Ti に近い六方晶構造をもつ物質であると考えられる。ただし、面間距離や角度が Nb_3S_6Ti とは若干異なることから、介在物の同定にはさらに詳細な検討を要する。また、今回の実験でSUS630Mod.にNb-Ti-S系介在物が生成したのは、S: 0.02%以上、Ti: 0.06%以上の成分範囲の場合だった。ただし、TiはCやNとも親和性の高い元素であるため、Nb-Ti-S系介在物が安定して存在する合金成分範囲は、これらの量によっても変化すると考えられる。

Fig.4に、直径20mm鍛伸-ST状態のミクロ組織を示す。SUS630Mod.鋼は、ST状態においてマルテンサイト組織を呈する。

3・2 被削性

SUS630Mod.について、被削性に及ぼすS添加量およびTi添加の影響を調査した。0.003%S鋼、0.016%S鋼、および0.021%S-0.072%Ti鋼のドリル寿命試験結果を

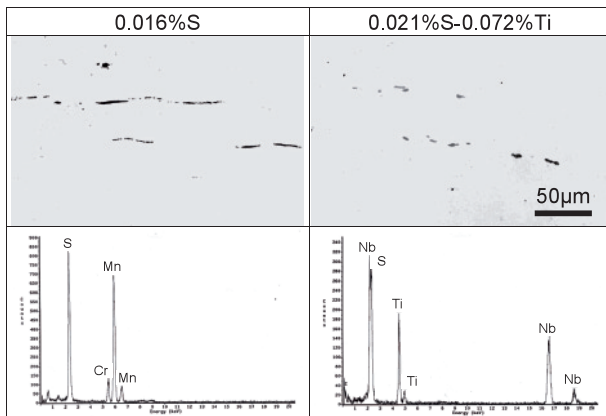


Fig.2 Inclusion morphology and EDX spectrum.

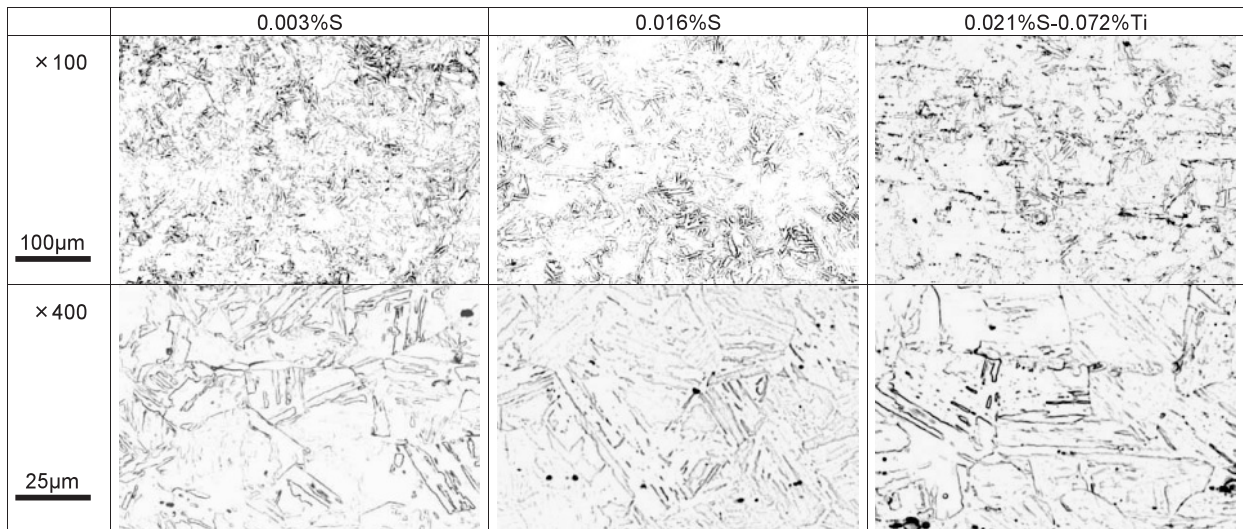


Fig.4 Microstructures in solution treated condition.

Fig.5に示す。Sを単独添加した0.016%S鋼は、0.003%S鋼と比較して、ドリル寿命の向上は僅かだった。一方、S+Ti複合添加した0.021%S-0.072%Ti鋼のドリル寿命は、同程度のS量を含む0.016%S鋼よりも2~4倍に長くなっており、大幅なドリル寿命改善が認められた。

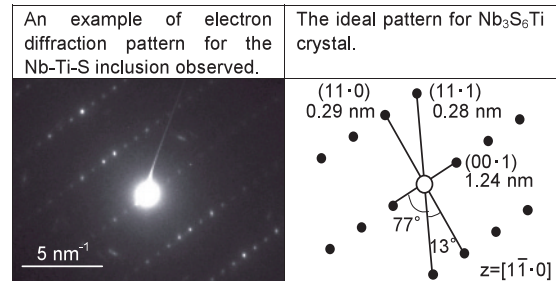


Fig.3 Electron diffraction pattern for the Nb-Ti-S inclusion observed.

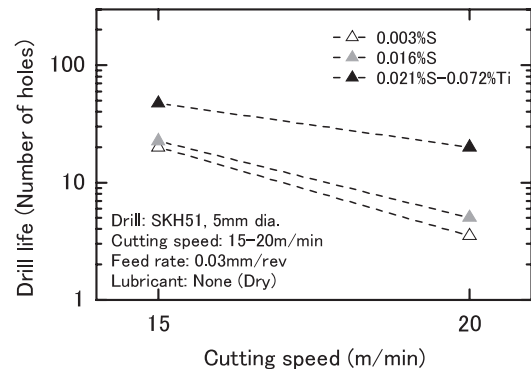


Fig.5 Effect of sulfur content and titanium addition on drill life.

Fig.6に、S+Ti複合添加鋼（0.021%S-0.072%Ti）をドリル穿孔した後のドリル先端部を切刃逃げ面側から観察したSEM写真と刃先のEDX分析結果を示す。切刃部の刃先には白い付着物が認められ、EDX分析では、ハイスドリルの主成分であるFe, Mo, W, Cr, V, Cの他に、被削材成分に由来すると思われるFe, Cr, Ni, Nb, S, Tiが検出された。なお、Tiのピークは、被削材マトリクス成分であるNiのピークと比べても相対的に高く、Tiからなる介在物として刃先に付着していると推定される。従って、S+Ti複合添加鋼のドリル寿命が優れていた理由は、生成したNb-Ti-S系介在物がドリル刃先を被覆して摩耗を抑制したことによると考えられる。

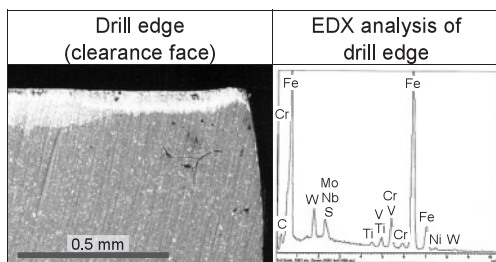


Fig.6 Drill edge observation after drilling SUS630Mod. containing both sulfur and titanium.

Fig.7には、SUS630Mod.を超硬チップを用いて旋削したときの逃げ面摩耗量を示す。Sを0.003%から0.016%に増加させた場合ほとんど変わらないが、S+Ti複合添加した場合はS単独添加よりも摩耗量が約30%少ない結果が得られた。このときにも、S+Ti複合添加鋼を切削した後の工具表面には、Nb, S, Tiからなる付着物が認められており、Nb-Ti-S系介在物の被覆効果により工具摩耗が抑制されていると推測される。

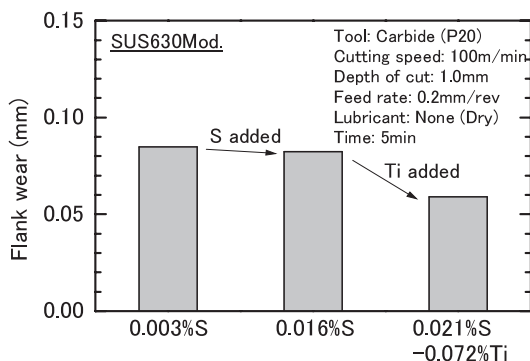


Fig.7 Effect of sulfur and titanium on turning tool wear of SUS630Mod.

上記のように、S+Ti複合添加は、ドリル寿命改善および旋削工具摩耗低減に効果があることがわかった。そこで、

次に被削性に及ぼすSおよびTiの添加量の影響を検討した。S量をおよそ0.02%, 0.03%, 0.04%の3水準にそろえて、Ti量を変えて添加した場合のドリル寿命を比較した結果を、Fig.8に示す。これによると、S量の増加によりドリル寿命が向上する傾向が確認できる。さらに、0.02%Sベースでは、前述のようにTiを0.072%添加することにより長寿命化したのに対し、0.03%Sベースでは、Ti添加量が0.056%から0.157%に変化してもドリル寿命の変化は認められなかった。

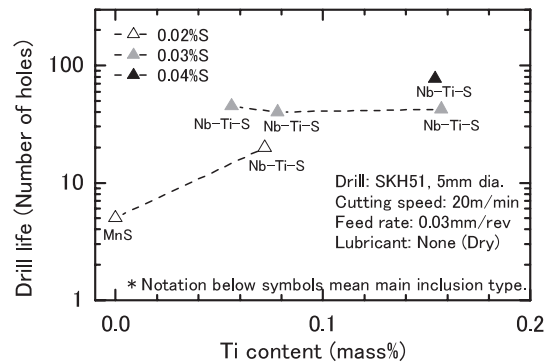


Fig.8 Effect of sulfur and titanium content on drill life of SUS630Mod.

これらの結果は、ドリル寿命が、介在物量のみならず介在物組成に影響されることを示している。すなわち、0.02%S鋼の場合にみられるように、Ti添加により生成介在物がMnSからNb-Ti-S系に変化するとドリル寿命が向上するが、Ti量が十分でNb-Ti-S系介在物が生成している場合（0.03%S鋼）、ドリル寿命はTi量によらずS量によってほぼ決定されている。以上の結果から、被削性改善には、S量の増加の他に、Nb-Ti-S系介在物を生成させるためのTi, Sその他元素の調整が必要であることがわかる。

3・3 硬さ

Fig.9に、Sを0.003~0.043%, Tiを0~0.154%に変化させた場合の熱処理硬さを示す。今回の供試材の成分範囲では、硬さに及ぼすS, Tiの影響は認められなかった。

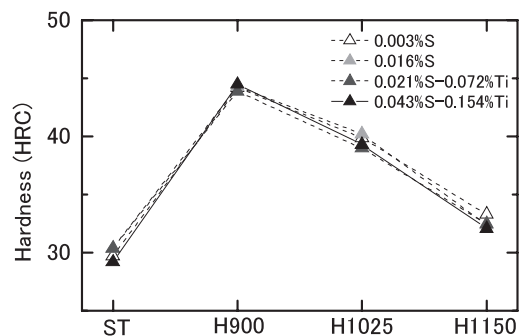


Fig.9 Effect of sulfur and titanium on hardness of SUS630Mod.

3・4 靱性

Fig.10に、シャルピー衝撃値に及ぼすS, Ti添加の影響を示す。ST状態および析出硬化熱処理状態のいずれにおいても、衝撃値はS量が増加すると低下した。同レベルのS量（0.02%S）を添加した鋼種間で比較した場合、Ti量が0と0.072%では同程度の衝撃値であり、靱性に及ぼすTi添加の影響はみられなかった。

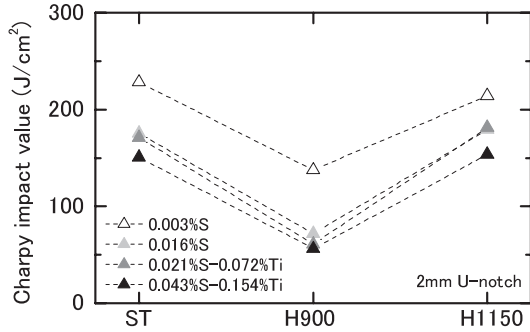


Fig.10 Effect of sulfur and titanium on toughness of SUS630Mod.

3・5 耐食性

耐食性は、Cr, Moなどの合金元素量のほかに、介在物量および組成に大きく影響されることが予想される。Fig.11に、析出硬化熱処理（H900）材の孔食腐食度を、S量とTi添加有無で整理して示す。S量の増加に伴い耐食性は低下するが、Ti無添加のものはS量の増加に伴い腐食度が急激に増大するのに対し、Ti添加鋼はTi無添加鋼と比較すると若干腐食度が低くなる傾向があった。

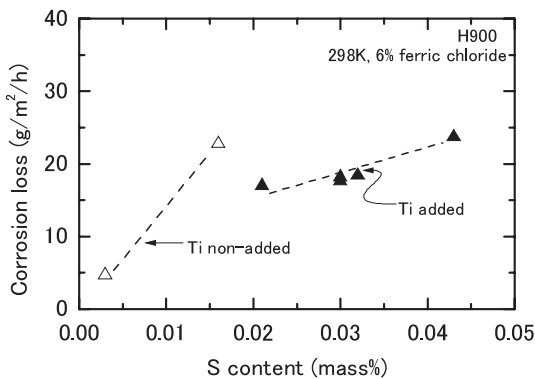


Fig.11 Effect of sulfur and titanium on corrosion resistance of SUS630Mod.

3・6 疲労強度

Fig.12に、析出硬化熱処理（H900）材の小野式回転曲げ疲労試験結果を示す。0.003%S鋼と比較して、0.021%S-0.072%Ti鋼の疲労限は同等であり、この成分範囲内では疲労強度に及ぼすS, Ti添加の影響はないと考えられる。

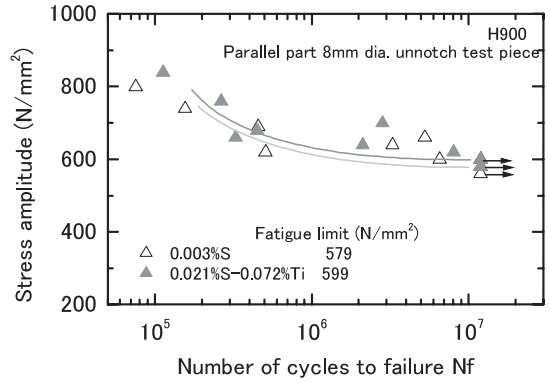


Fig.12 Effect of sulfur and titanium on rotating bending fatigue strength of SUS630Mod.

4. 結言

SUS630系析出硬化型ステンレス鋼の被削性改善を目的として、低C化したSUS630改良鋼の被削性その他諸特性に及ぼすS, Ti添加の影響について調査した。

- 1) 鋼中に生成した硫化物系介在物は、S単独添加の場合は若干のCrを含むMnSだったが、S+Ti複合添加（S: 0.02%以上, Ti: 0.06%以上）の場合はNb-Ti-S系介在物が生じた。
- 2) 同じS量レベルでも、Tiを添加してNb-Ti-S系介在物が生成した鋼種は、MnS系介在物を含有した鋼種より、ドリル寿命が長く、旋削工具摩耗が少なかった。これは、Nb-Ti-S系介在物による切刃部への被覆効果であると考えられる。
- 3) 硬さに関してS, Tiの影響はなく、靱性はS量の増加により低下するがTiの影響はなかった。耐食性はS量の増加に伴い低下するもののTiと複合添加することでやや改善された。回転曲げ疲労強度は、0.02%S-0.07%Tiまで、S, Tiの影響はみられなかった。

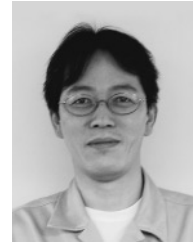
文 献

- 1) 今井勇之進, 増本健: 日本金属学会会報, **3** (1964) 11, p581
- 2) CRUCIBLE 17Cr-4Ni SUPER-X, Alloy Digest SS-521 (1991)
- 3) 神吉保宗, 池田裕樹, 磯本辰郎, 阿部源隆: CAMP-ISIJ, **6** (1993) 3, p723
- 4) 横田博史: 愛鋼技報, **10** (1990) 1, p20
- 5) ARMCO 17-4PH, Alloy Digest SS-7 (1989)
- 6) CARPENTER CUSTOM 630, Alloy Digest SS-258 (2000)
- 7) 高田揚大, 柳谷彰彦, 田中義和, 馬明満, 伊藤永勝: まてりあ, **37** (1998) 4, p61
- 8) 清水哲也, 石川浩一, 野田俊治, 及川勝成, 石田清仁: 電気製鋼, **73** (2002) 2, p121

■ 著者



中間 一夫



春名 靖志

