論
Paper
説

フェライト系快削ステンレス鋼SUS430Fの各種特性に及ぼすMn/S比の影響とHDD用ステンレス鋼の開発

清水哲也*¹, 長島友孝*², 古賀 猛*¹, 岡部道生*³

Influence of Mn/S on the Outgas Property and the Machinability of Type 430F and Development of a New Free-machining Ferritic Stainless Steel for HDD Components

Tetsuya Shimizu, Tomotaka Nagashima, Takeshi Koga, and Michio Okabe

Synopsis

The influence of Mn/S on the outgas property and the machinability of type 430F has been investigated and the following results were obtained.

- 1) The degree of outgas decreased with Mn/S because of enhancement of the chemical stability of sulfide by substitution of Cr for Mn in sulfide.*
- 2) The machinability in turning and drilling decreased with Mn/S. The reasons have been suggested that the aspect ratio of sulfide got larger and also the hardness of sulfide increased with Cr contents in sulfide.*

On the basis of the above results, a new free-machining ferritic stainless steel, DHS1 has been developed for hard disk drives, which has 19Cr-0.35Mn-0.26S+Pb,Te; mass%. This advanced steel is superior in machinability and corrosion resistance to type 430F and also has low outgas emissivity.

1. 緒 言

ハードディスクドライブ (HDD) は、コンピュータのパーソナルユーズの広がり、およびコストの上昇を抑えた上で、著しい高性能化、小型化が図られてきたことから、現在、コンピュータの外部記憶装置として最も広く用いられている機器であり、その生産量は飛躍的に増加している¹⁾。

このような、高性能化、小型化により、構成部品は極限まで狭小化され、それとともに使用されている材料に対しても新たな要求がなされるようになってきた。

HDDに使用されるスピンドルモータには、多くのステンレスが幾度かの鋼種変遷を経て用いられてきた。たと

えばハブやヨークなどと呼ばれる部品は、開発初期の頃は、オーステナイト系のSUS303が使用されたが、低コスト化のため、マルテンサイト系のSUS416に替わり、その後より高い耐食性を有するSUS430Fが用いられてきた。いずれも硫黄を添加し硫化物を形成することにより被削性を向上させた快削ステンレス鋼であり、その時々において部品に要求される、耐食性などの特性を、不動態化などの後工程の処理を含め確保しつつ、高い生産性を実現してきた。

最近、これら鋼種に含まれる硫化物から硫化ガスが発生する、いわゆるアウトガスやSulfur Emissionと呼ばれる現象が、使用環境によっては起こり、周辺の部品を劣化させるという懸念がクローズアップされてきた。一方で、部品自体の加工精度もより一層高くなっており、上

1999年5月31日受付

* 1 大同特殊鋼 (株) 技術開発研究所 (Research & Development Lab., Daido Steel Co., Ltd.), * 2 大同特殊鋼 (株) 星崎工場 (Hoshizaki Plant, Daido Steel Co., Ltd.), * 3 大同特殊鋼 (株) 技術開発研究所, 工博 (Dr. Eng., Research & Development Lab., Daido Steel Co., Ltd.)

記に示したような鋼種では仕上げ精度が対応できず、より高い被削性を有する鋼種が求められるようになってきた。

被削性に関しては、硫黄の他に、鉛、テルルなどを含む複合系の快削ステンレス鋼を用いることで対応できることから、DSR6Fなどの鋼種が適用されている。

また、アウトガスに対しては、Mn/Sの低減により、MnSの耐溶出性を高め、鋼種全体の耐食性の向上を図れることが知られており、この手法を用いることで改善できる可能性がある^{2)~4)}。

本研究では、まずSUS430Fについて、アウトガス特性をはじめとする各種の特性に及ぼすMn/Sの影響を明確にした上で、SUS430Fより被削性に優れたアウトガス対策材として新たに開発した鋼種について報告する。

2. SUS430Fの各種特性に及ぼすMn/Sの影響

2.1 供試材

供試材にはTable 1に示す7鋼種を用いた。SUS430FのMn/Sは3.1であり、これをベースとして、Mnを徐々に減少させ、Mn/Sを0.5~3.1まで変動させた。

いずれも真空高周波誘導炉により50kg鋼塊を作製し、熱間鍛造により、85mmと20mmの丸棒および35mm角の3種の形状に加工した。いずれの形状品も、その後780℃で4時間保持後空冷する条件で焼鈍を行い、それぞれの試験に供した。

2.2 試験方法

評価した特性は、介在物形態の調査の他、アウトガス特性、および被削性のそれぞれについて下記の条件で実施した。

2.2.1 介在物形態

介在物の形態調査には、85mmの丸棒の1/2半径部の縦断面を鏡面まで順次研磨した試料を用いた。調査は、光学顕微鏡観察の他、介在物形態の定量化のため市販の画像解析ソフトを用い、各試料400倍の倍率で40視野ずつ、介在物の面積率、軸比、円相当径を調査した。また、各

鋼種、任意の10個の介在物について、X線マイクロアナライザーにより硫化物の組成分析も実施した。

2.2.2 アウトガス特性

アウトガス特性の評価には、20mmの丸棒から、 ϕ 10mm×5mmに加工し、表面を6.3Sまで仕上げた試験片を用いた。

また、HDDに使用されるステンレス鋼は、耐食性確保などのため、通常不動態化処理が施されることから、この影響を確認するため、アセトン拭きの脱脂ままの状態と、脱脂後、50℃、30%硝酸溶液中に1時間浸漬する不動態処理を実施した試験片の2種について評価した。なお、不動態化処理の際の溶液の残留を抑制するため、不動態化処理後は、純水中での超音波洗浄を2回繰り返した後、試験に供した。

発生したアウトガス、ここではイオウガスの程度を評価するため、Agを用いた。Agは、非常に硫化しやすく、生成した硫化銀は黒色をしているため、その黒色の程度で生成量、すなわちアウトガス発生量を容易に評価することができる。今回は、市販の0.1mm厚の箔から5mm×10mmの形状を切り出し、黒色度が判別しやすいように、あらかじめ30%硝酸中に浸漬し白色化した小片を用いた。

試験は、容量250ccの蓋付きガラス製密閉容器中に、試験片3個と、白色化したAg箔および、0.5mlの純水を、お互いが接触しないよう入れ、密閉した後、恒温器中で85℃、20h保持する条件にて行った。

評価は、Ag箔の黒色度を全く変化のないレベルAから、黒色化の程度により順次レベルEまでの5段階に分けて行った。

なお、黒色化したAgの生成物が硫化物であることの裏付けとして、SUS430Fで予備試験を実施し、赤外線燃焼法により黒色化したAg箔にSが多量に含まれていることを確認した。

2.2.3 被削性

被削性は、旋削試験およびドリル寿命試験の2種により評価した。

Table 1. Chemical compositions for experimental steels.

Mn/S	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	N	O
0.5	0.052	0.30	0.15	0.023	0.301	0.10	0.30	16.37	0.01	0.040	0.0168
1.0	0.055	0.30	0.32	0.022	0.320	0.10	0.30	16.43	0.01	0.033	0.0178
1.3	0.043	0.29	0.40	0.021	0.307	0.10	0.29	16.40	0.01	0.037	0.0192
1.4	0.048	0.29	0.46	0.022	0.320	0.10	0.29	16.37	0.01	0.034	0.0171
1.8	0.047	0.29	0.58	0.022	0.316	0.10	0.29	16.44	0.01	0.035	0.0201
2.1	0.045	0.29	0.64	0.022	0.308	0.10	0.29	16.41	0.01	0.034	0.0179
3.1	0.044	0.28	1.00	0.022	0.318	0.10	0.29	16.41	0.01	0.037	0.0178

旋削試験は、 $\phi 85\text{mm}$ の材料を用い、下記の条件で外削加工を行った。

工具材質：超硬（ST120）

切込み量：1.0mm

送り：0.15mm/rev

切削速度：100m/min

潤滑：無し（乾式）

加工中任意の時間で、工具の平均フランク摩耗量を測定し、切削時間－摩耗量曲線から、摩耗量が $200\mu\text{m}$ となる切削時間（VB200）を求め、これを工具寿命として評価した。

ドリル試験は、35mm角の材料から30mm×30mm×200mmの形状を切出し、一面をドリル穴加工面とし6.3Sまで仕上げた。

試験は以下の条件で行い、種々の切削速度で切削不能となるまでの切削距離を工具寿命として測定し、切削速度－工具寿命線図から、工具寿命が5000mmとなる切削速度（VL5000）により評価した。

工具：SKH51製ストレートシャンクドリル

（ $\phi 5\text{mm}$ ，先端角 118° ）

送り：0.07mm/rev

穴形状：20mm深さ，非貫通

潤滑：無し（乾式）

2. 3 結 果

2. 3. 1 介在物形態

Fig.1に、各鋼種の研磨まゝの状態での縦断方向のミクロ組織を示す。被削性には、介在物の形態が大きな影響を及ぼすことから、今回のミクロ組織は、旋削試験を行う $\phi 85\text{mm}$ 材を用いた。そのため、50kg鋼塊からの鍛錬比は2.5S程度と小さく、硫化物はいずれもあまり伸長しておらず、比較的紡錘型となっている。なお、EPMAの点分析により、図中、灰色の島状介在物が硫化物であり、硫化物と母相の境界に存在する黒色の粒状介在物は、Siを中心とした酸化物であることを確認している。

Fig.2にEPMAによる硫化物中のCr量の測定、および硫化物の画像解析の結果から得られた、硫化物のアスペクト

Fig. 2. Influence of Mn/S on Cr contents in sulfide and aspect ratio of sulfide for Fe-16wt%Cr-0.3wt%S.

Fig. 1. Longitudinal cross section of experimental steels.

ト（長軸／短軸）比の調査結果を示す。

古賀らが調査した、20%Cr-2%Mo系と同様⁴⁾、Mn/Sの低下により、硫化物中のCr量は単調に増加しており、Mn/Sが最小の0.5のときには、Cr量は40at%を超えており、硫化物はほぼCrとSから構成されている。一方で、上述のように、鍛錬比が比較的小さかったにもかかわらず、Mn/Sの低下と共に、硫化物のアスペクト比は大きくなっていた。

2. 3. 2 アウトガス特性

Fig.3にアウトガス試験後のAg箔の外観を、また、Ag箔の黒色度をランクAからランクEまでに判別した結果をFig.4に示す。試験中に取扱い易いように、Ag箔はL字型に曲げて使用しており、図中のAg箔の中心部の線は、折り曲げた跡である。

Mn/Sが3.1の通常SUS430Fは、Ag箔の黒色化が著しく、その程度は、Mn/Sの低下に伴い単調に小さくなる、すなわちMn/Sの低下と共に硫化物の生成が少なくなっている。また、通常耐食性の向上のために行われる不動態化処理は、全体的にアウトガス特性を劣化させる。

2. 3. 3 被削性

旋削試験の結果をFig.5に、ドリル寿命試験の結果をFig.6にそれぞれ示す。旋削試験の際の工具寿命、ドリル試験の際の5000mm穴をあけられる切削速度も、Mn/Sの低下と共に徐々に下がる、すなわち、旋削性もドリル

Fig. 4. Influence of Mn/S on outgas rating for Fe-16wt%Cr-0.3wt%S.

穿孔性もMn/Sの低減により劣化する。

2. 3. 4 結果の検討

SUS430FのMn/Sの低減の影響として、硫化物中のCr含有量の増加、耐アウトガス性が向上すること、ならびに被削性が低下することを確認した。

このうち、アウトガス抑制の効果は、硫化物に含まれるCr量が増大することにより、硫化物自体が化学的に安定となったためと考えられる。また、母相自体の耐食性を向上させるために行われる不動態化処理が、アウトガスを促進する原因としては、硝酸などの酸化性の酸への浸漬により、硫化物の溶出ならびに硫化ガス生成反応を促進したためと推察される。

なお、被削性の低下は、硫化物中のCr濃度の上昇と共

Fig. 3. Influence of Mn/S on outgas for Fe-16wt%Cr-0.3wt%S.

Fig. 5. Influence of Mn/S on machinability in turning for Fe-16wt%Cr-0.3wt%S.

Fig. 6. Influence of Mn/S on machinability in drilling for Fe-16wt%Cr-0.3wt%S.

に、介在物の形態が、紡錘型から紐状に変化したことが主因であり、他に硫化物の被削性向上効果である、潤滑効果および切り粉破碎性が、より硬質なCr系の硫化物⁵⁾に変わったことが要因として挙げられる。ここで、Mn/Sの低下により、硫化物の形態が、より紐状になる、すなわちより展伸性が高くなるということは、Cr含有量が高くなり、より硬質な硫化物となることと一見相反する。これは、たとえば、酸素のように、MnS中へ固溶する一方で、酸化物を形成するような元素が、硫化物の構成成分の変化により、硫化物への関与の仕方が変わり、形態にも影響を及ぼすなど、硫化物の形態が、S, Mn, Crだけでなく、他の元素の影響も受けているということで説明できるが、証左を含め詳細については今後検討を

要する。

3. 耐アウトガス性を確保したHDD用ステンレス鋼の検討

3. 1 合金設計

前述したように、HDD用のステンレス鋼には、SUS430Fを超える被削性を有しつつ、優れた耐アウトガス性が求められる。

合金設計の考え方としては、耐アウトガス性を向上させるためMn/Sを低減し、それにより低下する被削性は、他の快削元素の添加で対応することが挙げられる。

そのような考え方のもと、Table 2に示す鋼種DHS1を設計した。

Table 2. Nominal compositions of DHS1.

C	Si	Mn	P	S	Cr	Pb	Te	Mn/S
0.01	0.30	0.35	0.02	0.28	19	0.16	0.04	1.25

Mn/Sは1.25前後にコントロールし、耐アウトガス性を確保すると共に、被削性の向上のためPb, Teを添加している。この中でTeは、添加量自体は少量ではあるが、被削性に効果のある紡錘型に硫化物の形態を制御するのには極めて有効な元素である。

また、Cr量もSUS430Fに比べ高めており、耐食性の向上も図っている。

3. 2 特性

Fig.7にDHS1のミクロ組織を示す。*4.6t鋼塊を溶製し、熱間圧延後、焼鈍、皮剥ぎを行いφ25とした材料である。同様の工程で製造されたSUS430Fと比較して、介在物の紡錘形の度合いが強い。

以下の評価も同様に製造した材料を供試材とした。

アウトガス性は、不動態化処理条件を含め、前述と同様の方法により評価した。Fig.8に試験後のAg箔の外観を示す。DHS1はSUS430Fより明らかに耐アウトガス性

Fig. 7. Longitudinal cross section of DHS1 (as polished).

Fig. 8. Ag foils after outgas test.

が向上しており、特に、脱脂ままの状態では、非常に優れた耐アウトガス性を有する。

被削性も、Mn/Sは低くなっているにもかかわらず、PbおよびTeを添加し、適正な成分バランスを確保したことにより、DHS1はSUS430Fを超える被削性を有する。

Fig.9, Fig.10に旋削試験およびドリル寿命試験結果の例を示すが、種々のSUS430Fのデータに比較し、DHS1はより優れた被削性を示している。

Fig. 9. Machinability in turning of DHS1.

Fig. 10. Machinability in drilling of DHS1.

Fig.11には、腐食試験の結果を示すがMn/Sの適正化およびCrの増量などにより、SUS430Fより優れた耐食性を有しており、今回実施した湿潤環境程度では不動態化処理なしでも、発錆は認められなかった。

Fig. 11. Test pieces after corrosion test at 50C/98%RH for 96h.

なお、Table 3, Table 4には機械的性質および物理特性を示すが、DHS1は、SUS430F対比で若干強度が低いものの、これらの特性はSUS430Fとほぼ同等の特性を有する。

4. まとめ

SUS430FのMn/Sを低減することにより、硫化物中のCr含有量が増加する。これにより、硫化物自体の化学的安定性が向上し、アウトガスを抑制する。

一方、Mn/Sの低減は、被削性を低下させる。これは、硫化物中のCr濃度の上昇と共に、介在物の形態が、紡錘型から紐状に変化したことが主因であり、また、硫化物の被削性向上効果である、潤滑効果および切り粉破碎性が、より硬質なCr系の硫化物に変わったためと考えられる。

なお、母相自体の耐食性を向上させるために行われる不動態化処理はアウトガスを促進する。

上記の結果を考慮した上で、SUS430Fより被削性、耐食性に優れたHDD用アウトガス対策材としてFe-19Cr-0.35Mn-0.26S-Pb,Te鋼（DHS1）を開発した。

Table 3. Mechanical properties of DHS1.

	0.2%proof stress;MPa	Tensile Strength; MPa	Elongation; %	Reduction of Area;%	Hardness HB
DHS1	284	451	38	55	143
SUS430F	311	508	32	58	160

Table 4. Physical properties of DHS1

	Density RT; g/cm ³	Young's Modulus RT;GPa	Thermal Expansion Coefficient RT-200C; ×10 ⁻⁶	Maximum Magnetic Permeability; μ m
DHS1	7.6	192	10.1	770
SUS430F	7.7	199	10.4	680

(文 献)

- 1) 例えばNIKKEI MECHANICAL, No.481(1996.5.27), 24
- 2) 小野清雄, 河野富夫: 電気製鋼, **51** (1980), 122
- 3) 高橋ら: 日本ステンレス技報, **16** (1981), 47
- 4) 古賀ら: 電気製鋼, **67** (1996), 75
- 5) C. W. Kovach, A. Moskowitz: Trans. of the Metallurgical Society of AIME, (1969), 2157