

(解説)

磁気ディスク用アルミニウム合金基盤の技術動向と当社の製造技術

Technical Trend and Process Technologies in Aluminum Alloy Substrates for Magnetic Memory Disks



加藤良則*
Yoshinori Kato



梅田秀俊*
Hidetoshi Umeda



岡田圭司**
Keiji Okada



高木隆行**
Takayuki Takagi

Aluminum alloy substrates are widely used in hard disk drives; approximately 400 million aluminum blanks are shipped annually. Kobe Steel, which has an integrated production line from aluminum alloy to aluminum substrate, has a 50-60% share of the aluminum blank production market and has contributed significantly to the development of high performance hard disk drives. In this report, development and process technology of aluminum alloy substrates are described.

まえがき = ハードディスクドライブ(以下HDD)は、ほかの記録媒体に比べて、記録容量の大きさやデータ転送速度の速さなどが優れており、ほとんどのコンピュータに搭載されている。また、テレビ録画機に代表される家電製品へのHDD搭載が本格化するなど、用途の多様化が進み、HDDの需要は今後ますます増加していくと予測されている。

HDD装置の模式図を図1に示す¹⁾。データの読み書きは、高速で回転する基盤に対して、基板上を浮上するヘッドにより行われている。HDDが開発されてから約50年が経過しようとしているが、装置の構成は現在でもほとんど変わっていない。

図2に単位面積あたりの記録密度とフライングハイトの変化を示す²⁾。ヘッドや磁性膜の進歩により記録密度は増加し続けている。記憶容量は開発当初から1千万倍にもなっており、現在も年率50~100%で増加している。一方、メディア表面からのヘッド浮上高さであるフライングハイトは記録密度の上昇にともない低下し、現在では10nm以下の高さになっている。このため、メディアには、極微少な欠陥もなく、表面粗さが数以下の非常に平滑な表面が必要とされている。

アルミニウム合金板材は、記録媒体であるメディアの基盤材料としてHDD開発当初から使用されている。耐衝撃性が必要なノート型パソコンなどガラスメディアが使用されるモバイル用以外のHDD製品には、アルミニウム合金基盤を使用したメディアが搭載されており、アルミニウム合金を使用したメディアはHDD全体の約80%に搭載されている。

ブランクといわれるドーナツ形状にアルミ板を打抜き加工した基盤は、2003年度に年間約4億万枚の需要があ

ると予想されているが、当社では真岡製造所において、アルミ板材及びブランク材の製造を行っている。また、マレーシアのKPTEC社(当社のグループ企業)では、ブ

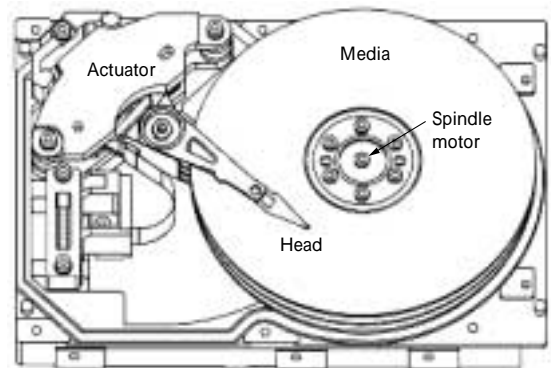


図1 ハードディスク装置の模式図¹⁾
Fig. 1 Schematic drawing of a hard disk drive¹⁾

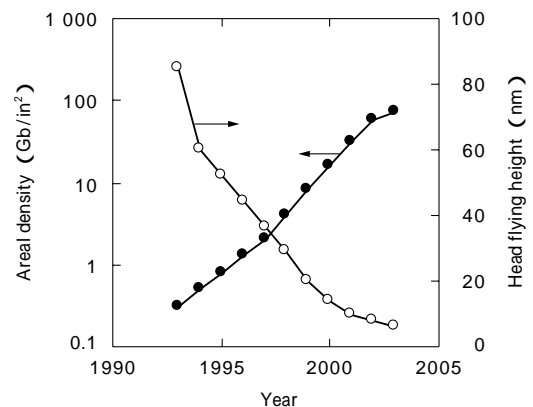


図2 面記録密度とフライングハイトの変化²⁾
Fig. 2 Change of areal density and head flying height²⁾

*アルミ・銅カンパニー 真岡製造所 アルミ板研究部 **アルミ・銅カンパニー 真岡製造所 製造部

ランク材の生産とブランクをグランド加工したアルミサブストレートの製造を行っており、HDD用ブランク材では、両社合わせて約60%の高い世界シェアを維持し続けている。また、アルミサブストレートの生産量では、KPTEC社は世界最大級の生産会社の一つである。

HDDの高性能化の進展と用途の多様化などから、アルミニウム基盤の性能向上やコスト低減などに対して強いニーズがあり、当社はアルミ板からアルミサブストレートまでの一貫生産体制を活かした開発を推進している。

以下に、磁気ディスク用アルミニウム合金基盤の技術動向と、当社の製造技術について述べる。

1. 磁気ディスク用基盤に求められる特性

アルミニウム合金板からNiP/Alサブストレートまでの製造工程を、表1に示す。HDD装置に組込まれるメディアは、アルミ板 ブランク アルミサブストレート NiP/Alサブストレートの順で製造され、メディア製造工程に投入される。NiP/Alサブストレートは、ブランクをグランド加工し表面を平滑にしたアルミサブストレートに無電解NiPめっき処理し、さらにAl₂O₃、SiO₂などを含んだポリッシュ溶液により研磨加工されて製造されている。メディアでは磁性膜や保護膜を表面に設けるが、最も重要な基盤表面の平滑性は、NiP/Alサブストレートの工程で決定されている。

表2に、めっきポリッシュ表面に求められる表面特性と測定装置を示す。高密度化、高速化するHDD装置では、メディア表面に微小欠陥がないことが大前提であり、さらにメディア表面と浮上するヘッド高さの変動がデータ信号の安定性に影響するため、粗さだけでなくμWa、Wa、平坦度などの長波長のうねり成分を低減する必要があるとされている。また、より大きな記憶容量を確保するために、ロールオフの低減も求められている。許容される微小欠陥サイズや粗さ、うねりなどの数値は年々小さくなってきており、アルミニウム合金、ブランク、アルミサブストレートの各工程において、より平滑なNiP/Alサブストレート表面を得るための開発が進められている。

記憶容量の増加は今後も続くが、現行の水平磁気記録では熱揺らぎなどにより、150ギガビット/(inch²)が限界といわれている³⁾。このため、垂直記録方式の媒体の開発が進んでおり、2004年にも垂直記録方式の媒体が実用化される可能性がある。垂直記録方式用の基盤に要求される特性はまだ明らかでない点もあるが、現状よりもより平滑なめっき表面が必要になることは確実である。

HDDでは、高容量化とともに基盤の回転速度も高速化している。データ転送速度を重視するHDDでは、基盤回転速度が10 000rpmを超えるHDDが市販されており、現在の主流である5 400rpmや7 200rpmの回転数もさらに高速化することが予想されている。

基盤の回転速度が上昇すると基盤は共振し、フライングハイトの安定性が低下するとされている⁴⁾。また、高密度化はより高いヘッドの位置決め精度を必要とするため、HDDの高容量化にともない基盤の振動抑制が課題となっている。基盤の振動抑制に対しては、振動発生の少ない流体軸受モータが採用されているが、基盤側からの対応も求められている。

基盤の固有振動数は、式(1)のように示され、基盤振動を抑制するためには、 E / ρ がより大きな材料の使用や、厚肉小径化などが有効となる。

$$f = \frac{h}{a^2} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 f : 固有振動数、 h : 厚さ、 a : 直径、 E : ヤング率、 ρ : 密度

一部のHDDメーカーでは、アルミニウム合金よりヤング率の高いガラス基盤が使用された。一方、アルミニウム合金では、高いヤング率を得ることができないため、高速回転に対しては、厚肉、小径化による高速回転対応が進められた。

現在では、コストや信頼性などの面から、アルミ基盤の厚肉、小径化による高速、高密度化対応が主流となっており、一部ガラス基盤が採用されたHDDも再びアルミニウム合金基盤が使用されるようになってきている。3.5inch基盤において、主流の板厚は1998年までの0.8mmから、1999～2003年では1.1～1.3mmとなり、2004年以降1.6～1.8mmになる予定である。

表2 めっき基盤表面の測定項目と測定装置
Table 2 Measurement items and devices for surface characteristics of NiP/Al substrate

| Item | Device | Wave length range |
|----------|---------------|-------------------|
| Ra | AFM | 0.08 - 10 μm |
| | Tencor | 0.8 - 38 μm |
| μWa | Zygo new view | 1.45 - 200 μm |
| Wa | Optiflat | 1.5 - 5.0mm |
| Flatness | Zygo mesa | 0.4 - 40mm |
| Roll-off | Zygo new view | 0.1 - 2.0mm |

表1 典型的な磁気ディスク基盤の製造工程
Table 1 Typical manufacturing process of aluminum alloy substrate for HDD

| Product | Process | | | | | | |
|---------------------|---------------|-----------|-------------------|--------------------|--------------|------------|--|
| Aluminum alloy coil | Melting | Casting | Soaking | Hot rolling | Cold rolling | | |
| Blank | Blanking | (Etching) | Stacking | Stack annealing | Separation | Inspection | |
| Aluminum substrate | ID/OD | Annealing | 1st, 2nd grinding | Annealing | Cleaning | Inspection | |
| NiP/Al substrate | Pre-treatment | Plating | Annealing | 1st, 2nd polishing | Cleaning | Inspection | |

表3 代表的なディスク用合金の化学成分
Table 3 Chemical composition of typical disk alloys

| Alloy | Chemical composition (wt%) | | | | | | | | Period of service |
|--------|----------------------------|------|------|------|-----|------|------|------|-------------------|
| | Si | Fe | Cu | Mn | Mg | Cr | Zn | Al | |
| AA5086 | 0.02 | 0.06 | - | 0.30 | 4.0 | 0.06 | - | Rem. | 1983 ~ 1988 |
| KS5C86 | 0.02 | 0.04 | 0.12 | - | 4.0 | 0.06 | 0.30 | Rem. | 1986 ~ 1991 |
| KS5D86 | 0.02 | 0.02 | 0.06 | - | 4.0 | 0.06 | 0.15 | Rem. | 1989 ~ |

2. 磁気ディスク用アルミニウム合金

表3に、これまで使用されてきたアルミニウム合金の化学成分を示す。HDDにめっき基盤が採用された当初は、AA5086が採用されていた。しかし、高密度化に向けてめっき面の平滑性をより高めるニーズに応えるべく、高純度地金使用による不純物低減や合金成分によるめっき性改善などが行われ、ディスク用アルミニウム合金の高性能化が図られてきた^{5),6)}。

現在使用されているKS5D86に含まれる成分は、Mg, Zn, Cr, Cu, Si, Feなどであり、このうち、Mgは高強度化、Crは結晶粒の微細化のため添加されている。

ほかのSi, Fe, Cu, Znについては、めっき面やアルミサブストレート製造時の研削性に大きな影響を及ぼすため、以下に詳細を述べる。

Si及びFeは不純物元素であり、Mg₂SiやAl₃Fe粗大化の原因ともなる。Mg₂SiやAl₃Feはめっき前処理中に溶解し、めっき表面へも影響を及ぼす。それぞれの金属間化合物のめっき前処理における挙動やめっき面に及ぼす影響は、詳細に調べられている⁷⁾。Mg₂Siはめっき前処理中でMgのみが選択溶解することで、めっき面のピットやめっき後の加熱工程によるマイクロプリスタの原因となり⁸⁾、Al₃Feはめっき面ピットの原因となるとされている。このため、ディスク用のアルミニウム合金では、金属間化合物であるMg₂Si及びAl₃Feのサイズが厳しく制御されている。図3にそれぞれの化合物のサイズ分布を示す。高密度化に対応するため、Si, Fe量の低減と製造条件による金属間化合物サイズの低減、制御が行われ、当社では十分な品質検査、保証体制も確立している。

また、アルミニウム合金中のSi, Fe量は、アルミサブストレート製造時の研削速度に対して、大きな影響を及ぼすことが明らかとなっている。図4に研削速度に及ぼすSi, Fe量の影響を示す。通常、Si量が多い合金では研削速度が低下し、Fe量の多い合金では、研削速度が向上する。

このように、Si, Fe量がアルミサブストレートの生産性に大きな影響を及ぼすため、1989年に現在のHDD用アルミニウム合金であるKS5D86が開発されてからも、Si及びFe量の低減とその比率の最適化による改善がめっき面欠陥の抑制と併せて続けられている。

次に、アルミニウム合金中のCu及びZn量の影響について述べる。Cu及びZnは、めっき前処理工程のエッチング性やジンケート性に大きな影響を及ぼす。

エッチング性に対しては、Cu添加量によりエッチング量の制御が可能である。また、結晶方位の電位差に起

因する粒界段差などの発生に、Cu及びZn量が関係することが明らかとなっている⁹⁾。

ジンケート性に対しても、Cu及びZn量がジンケート皮膜の析出形態や析出量に影響を及ぼしている¹⁰⁾。Cu及びZn量を変化させた合金をジンケート処理液に1s浸せさせた後、ジンケート皮膜の析出形態を観察した結果を写真1に示す。Cu添加量が多い合金では、ジンケート処理皮膜が微細な粒状に析出をする傾向があり、Zn添加量が多い合金では皮膜状に析出する傾向がある。また、図5に示すように、ジンケート皮膜量もCu, Zn添加量により差異が生じ、Cu添加量が多い合金はジンケート析出量が多くなる。

このようなジンケート皮膜形態や皮膜量の傾向は、ジンケート処理液組成や処理条件によっても大きく変化する

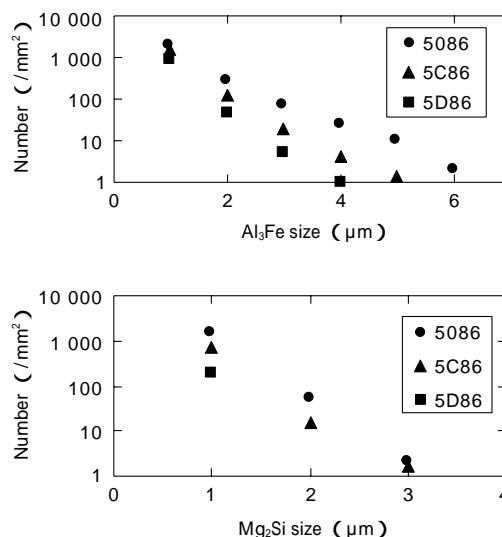


図3 Mg₂SiとAl₃Feの金属間化合物分布
Fig. 3 Distribution of Mg₂Si and Al₃Fe intermetallic compounds

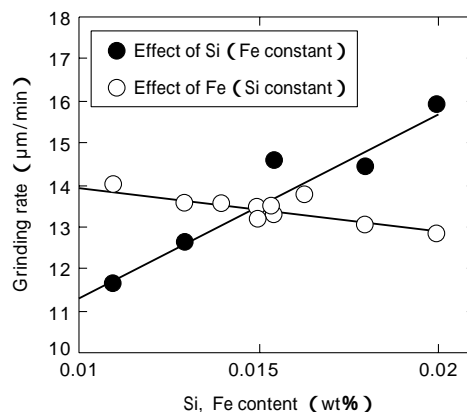


図4 研削性に及ぼすSi, Fe量の影響
Fig. 4 Effect of Si and Fe content on grinding rate

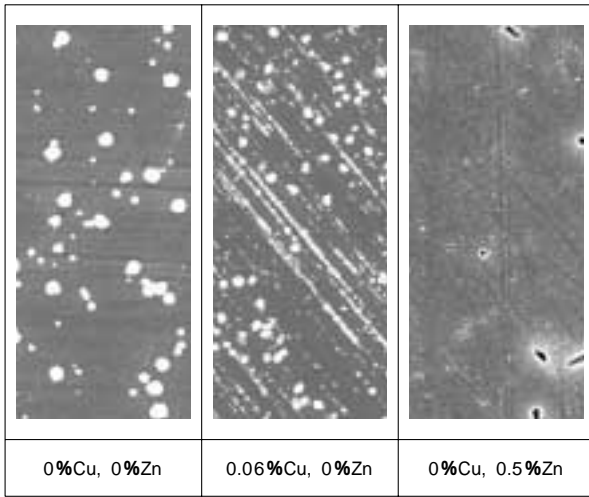


写真1 処理時間1sでのジンケートの析出形態
Photo 1 Morphology of the zincate film after treated for 1s

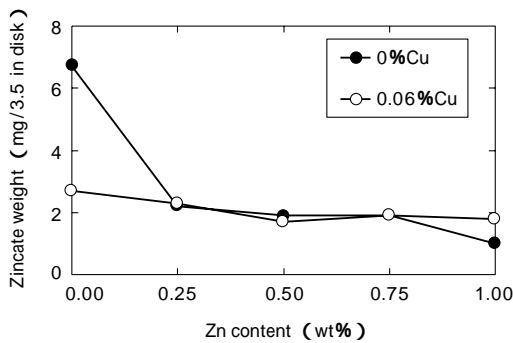


図5 ジンケート付着量に及ぼす Zn, Cu の影響
Fig. 5 Effect of Zn, Cu content on zincate weight

るため、合金組成とめっき前処理条件との組み合わせを考慮した合金成分の検討が行われてきた。さらに、今後進展していく高密度化に対応するため、新しい研削技術やめっき処理技術も開発されることが予測され、それらの条件と組合わせた最適化が今後の合金開発の課題である。

3. アルミニウム合金板の製造工程

磁気ディスク用アルミニウム板は、ほかのアルミニウム板と基本的に同様の工程で製造されるが、表面欠陥フリー、平坦度向上及びグランド加工時の生産性向上などの基盤に対する厳しい要求を満足するために、各製造工程ごとに特別の製造技術が確立されている。

溶解鋳造工程では、成分管理とならび介在物の混入防止及び除去が最大の課題であり、ディスク合金用の地金やフィルタの選定、溶解、鋳造条件が確立されている。

均熱、熱間圧延では、 Mg_2Si の固溶促進及び再析出防止のため、温度及び時間が厳密に制御されている。また、熱間圧延では、熱間ファイバと呼ばれるマクロ組織がめっき面のうねりに影響を及ぼすため、熱間圧延の圧下条件などの適正化が進められ、量産適用されている。

板厚のばらつきは、グランド加工の生産性悪化やブランクの平坦度悪化の原因となるため、板厚ばらつきの抑制は重要な課題である。板厚ばらつき抑制のために、熱間圧延におけるクラウン制御や冷間圧延における板厚制御技術が適用され、1.29mm板厚での板厚変動は ± 10

数 μm に制御されている。

4. ブランク製造工程

ブランク材は、アルミニウム合金板を打抜き加工し、平坦度矯正のための積付け焼鈍工程を経て製造される。

積付け焼鈍は、厚さ20~30mmのスペーサ間にブランクを積重ね、上下から加圧焼鈍される。加圧による弾性変形で、ブランクはスペーサと同じ平坦度まで矯正され、300以上の温度で焼鈍されることにより形状が固定され、残留応力も除去される。積付け焼鈍炉から取出された積付け定盤の外観写真を、写真2に示す。

スペーサには、ブランクとの熱膨張差による平坦度の悪化を防ぐため、ブランクとほぼ同じ熱膨張係数を持つアルミニウム合金が使用されている。スペーサの表面は、切削加工により平坦度 $1\mu m$ 程度に仕上げられ、傷付きや異物付着を防止するため陽極酸化処理されている。ブランクの平坦度には、スペーサの平坦度と表面管理が重要であり、当社では内製で数万枚/月のスペーサを製作し、ブランク製造のために使用している。

図6にブランク平坦度の変化を示す。ブランク平坦度は、スペーサ管理以外にも焼鈍条件や積付け方法の改善及び板厚変動抑制などの要因の寄与によって、 $4\mu m$ 以下の平坦度が安定して得られている。



写真2 積付け焼鈍されたブランク
Photo 2 Stacked disks for stress-relief annealing to be flated

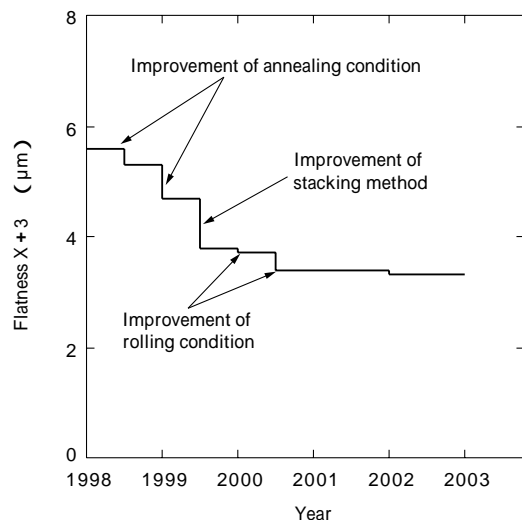


図6 ブランク平坦度の変化
Fig. 6 Change of blank flatness

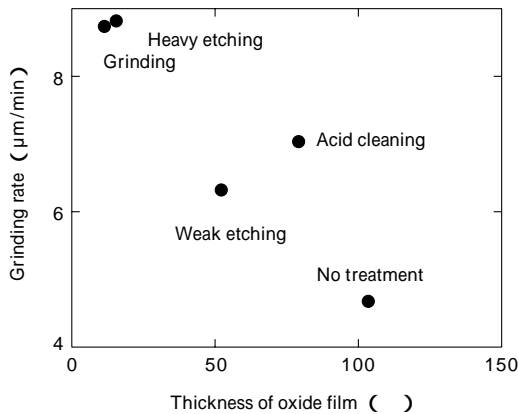


図7 酸化皮膜厚さと研削速度の関係

Fig.7 Relation between the thickness of oxide film and the grinding rate

アルミサブストレート作製時の酸化皮膜厚さと研削速度の関係を、図7に示す¹¹⁾。均熱や熱間圧延時に形成される酸化皮膜を除去することで研削性が向上するため、グランド加工前に酸化皮膜の除去が行われるのが一般的である。当社では、アルカリエッチング処理による酸化皮膜除去条件などの確立を進め、1997年に、積付け焼鈍前にエッチング処理を行ったエッチングブランクを開発した。このブランクは、ユーザでの酸化皮膜除去工程省略や研削性向上によるコストダウンに貢献している。

5. アルミサブストレートの製造工程

アルミサブストレートはブランクの内外径を端面加工した後、両面研削盤によるグランド加工により製造される。ブランクは、写真3に示すようにキャリアと呼ばれる枠の中に入れられ、上下をSiCを砥粒としたPVA砥石で表面粗度100程度まで加工される。

図8に、グランド加工後に発生したスクラッチと、そのスクラッチのめっき後の形状及びポリッシュ後に観察されるスクラッチの影響を、Optiflatにより観察した結果を示す。砥石の脱落や異物の混入などにより発生するアルミサブストレートのスクラッチは、めっき後もそのままの形状でめっき表面に残っている。めっき後のポリッシュによりスクラッチは確認できなくなるが、Optiflatなどの特殊な検査装置で観察すると、うねり成分としてスクラッチの影響が残っていることが確認できる。近年の高記憶密度メディアでは、アルミサブストレート表面のスクラッチが許容されなくなり、スクラッチフリー化が要求されている。また、スクラッチ以外にも、アルミサブストレートの粗さ、うねり及びロールオフなどは、めっき表面の品質を大きく左右するため、各項目に対してさらなる高品質化が求められている。このため、砥石、クーラント及び加工条件について、現在でも盛んに開発が行われている。

むすび=HDD装置はコンピュータ用の記録装置だけでなく、TV録画機やゲーム機などへの普及が始まっており、今後ますますその重要性が増すと考えられる。また、今後数年間、基盤需要はさらに増大していくものと

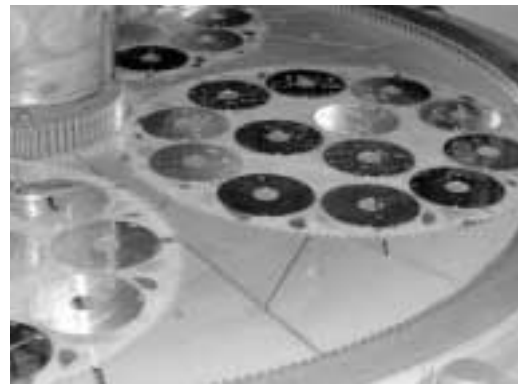


写真3 研磨機にセットされたブランク

Photo 3 Aluminum blank on the grinding stone of the grinder

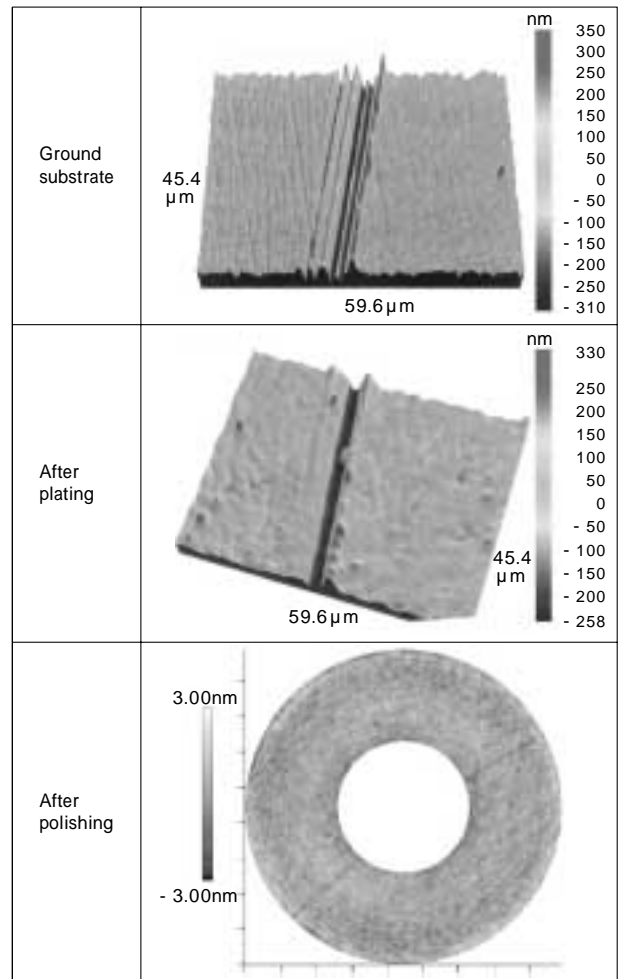


図8 スクラッチがポリッシュ面に及ぼす影響

Fig.8 Influence of the scratch of aluminum substrates on the polished NiP surface

予測されており、低コストで安定供給することも大きな課題となる。

磁気ディスク基盤素材としては、これまでアルミ合金に代わる新規素材として数多くの材料が検討されてきている。しかし、コスト競争力や大量生産性の面からアルミニウム合金が採用され続けており、当面アルミニウム合金に変わる素材が採用される動きはない。

技術的には、今後も記録容量の増加は続くと見込まれているが、一方で、現行の水平記録方式が限界を迎え、数年のうちには垂直記録方式に移行するといわれている。

HDD は記録方式の変化という大きな転換点を迎え、アルミニウム合金やその基盤の特性にもさらなる高度化が求められると予想される。このため当社は、次世代HDDに対応していけるよう、材料技術や製造技術などの開発に引続き注力していく考えである。

また、高速回転時の振動抑制のため基盤の厚肉化が進行しており、打抜き加工技術など厚肉化に対応するためのディスク製造技術の確立を現在推し進めている。

参 考 文 献

- 1) 国際ディスクドライブ協会編：最新ストレージ用語辞典 (2000), p.205, 日系BP社
- 2) 国際ディスクドライブ協会編：最新ストレージ用語辞典 (2000), p.315, 日系BP社
- 3) 日経エレクトロニクス：No.831 (2002), p.67.
- 4) Jeffrey S. McAllister：IEEE Transactions On Magnetics, Vol.32, No.3 (1996), p.1762.
- 5) 加藤良則ほか：R&D 神戸製鋼技報, Vol.50, No.3 (2000), p.50.
- 6) 碓井栄喜：Al・ある, Vol.212, No.7 (1984), p.8.
- 7) 加藤良則ほか：軽金属学会第 96 回春期大会講演概要 (1999), p.203.
- 8) Yasuhiro Hosomi: Sumitomo Light Metal Technical Reports, Vol.41, No.1 (2000), p.147.
- 9) 林 雄一ほか：R&D 神戸製鋼技報, Vol.48, No.3 (1998), p.5.
- 10) 梅田秀俊ほか：軽金属学会第 103 回秋期大会講演概要 (2002), p.193.
- 11) 加藤良則ほか：軽金属学会第 102 回春期大会講演概要 (2002), p.177.