

ハードディスクドライブ(HDD)における有機系アウトガス 種類・背景・今後

(独)国立環境研究所地球環境研究センター 勝本 正之

はじめに

現在の情報化社会においてハードディスクドライブ(HDD)は極めて重要な位置を占めており、2003年の出荷台数は約2億4000万台、来年は2億7000万台と予測され、その用途も今後携帯用情報端末(PDA)やゲーム機、車載用など多岐に拡大されるものと期待されている¹⁾。HDDの記録密度はいまや50Gbits/in²に達し今後も増加が見込まれているが、それを可能とするためのキーテクノロジーの一つが、部品およびドライブのコンタミネーション制御である^{2,3)}。本稿は有機系アウトガスについて、障害シミュレート研究でのガス種、コンタミネーションの背景、よりよい分析へむけての留意点等について述べる。なお、本稿で触れていない、材料のアウトガス挙動や測定方法等については既報⁴⁾を参照いただきたい。

1. 有機系アウトガスコンタミネーションと障害 シミュレーション研究例より

HDDのコンタミネーションは汚染物質の形態により、粒子(塵埃)・有機系アウトガス・非揮発性残渣(NVR)・陽イオンおよび陰イオンに分類される場合と、性状により、磨耗性、粘着性、腐食性等で分類される場合がある。アウトガスコンタミネーションでは、気体と極微粒子とを総称して分子状汚染物質(Airborne Molecular Contamination)と括る場合もある。気相 液相、気相 固相という状態変化が、微視的には境目が判然としないことを考えれば、ガス、液体、固体という固定概念ではなく、“気相に存在しうる、或いは気相を経由して移動しうる全ての有機化合物”を有機系アウトガスとして把握しておくのが適切といえよう。沸点が380-400以上、25での蒸気圧が10⁻⁷mmHg(1.3X10⁻⁵Pa)以下の粒子性有機化合物(POM)或いは非揮発性有機化合物(NVOC)でも、高感度の分析法によれば気相に存在しうることを示さる筈であり、「空中に存在しない」ということではないのである。有機系アウトガスのコンタミネーションおよびそれに起因する障害を考察する場合、このことを常に念頭におくべきである。

<PDMS(ポリジメチルシロキサン)>

PDMSの気体 粒子変換によるヘッド/ディスクインタフェイス(HDI)での珪素酸化物SiO_x生成はよく知られている。Ramanら⁵⁾は単板テスターを用い、浮上高さ55-60nm、ディスク回転数7200rpmで潤滑剤にZ-DOLまたは環状フォスファゼンX1Pを用い、D4あるいは粘着テープから発生するPDMS雰囲気下で浮上特性を調べ、前者でヘッド浮上量の低下とスライダーへのSiO_x堆積が生ずることから、ヘッド ディスク接触/瞬時昇温によるSiO_x生成機構に加え、潤滑剤の分解物が触媒となるシリコンの酸化がありうると示唆。SiO_xの生成確認はFTIR(1065,1265cm⁻¹)。

Xu⁶⁾らはガラス窓をとりつけた2.5"ドライブを用い、回転する透明ディスク上に浮上したスライダーのエアベアリング面(ABS)をD3-D15のPDMS雰囲気下でその場観察し、常に最も浮上高さが低い後端のエッジに核が生成し、成長してパッド面に到達すること、AFMで測定した高さから生成した核とディスクとの接触頻度が増大して核成長に至るとしている。生成物確認はEDX。

<炭化水素>

HDIにガスが凝縮したり表面を拡散移動した液体が侵入して惹き起こされる粘着(stiction)障害については、塵埃起因の障害同様、十数の研究例が報告されている。Fowlerら⁷⁾は'92-'99の研究例を中心に化学汚染(Chemical contamination)起因の障害をレビューし、部品レベルでの試験は現象の理解には示唆的であっても実ドライブでの減少と必ずしも結びつかないことを指摘し、実ドライブに極めて近い筐体で研究すべきことを提案。カーボンコートしZ-DOLを潤滑剤として用いたガラス円板上にヘッドを浮上させ、HDDの使用電力が最大となるよう、アクチュエーターを外周1/3がカバーされるようにシークさせて筐体内温度を75に保ち、テトラデカン、ヘプタデカンおよびオクタデカンを導入して、ヘッドのABSをその場観察。FTIRとTOF-SIMS分析からHDIにみられる液滴はGaoら⁸⁾の観察と異なり潤滑剤ではなく主として炭化水素と報告。

<フタル酸エステル(DOP:Diocetylphthalate と DEHP:Diethylhexylphthalate)>

フタル酸エステルは可塑剤として広範囲に使用されており室内環境でもよく検出される⁹⁾。Jesh ら¹⁰⁾はアクリル酸等粘着テープ(PSA)からのアウトガスが惹き起こす市販テスターを用いた障害の研究の中で、DEHP は凝縮するほど存在しなければ通常の初期粘着(stiction)や長期ランディング後の粘着(fly stiction)は起こらないと報告。また、DEHP を予め含む環境にパルミチン酸を加えると悪影響が緩和されるという Koka¹¹⁾の報告を引用し、複数の化学種が混在する実際の HDD では、化学種が単独で示すディスクドライブ性能への影響を加算的に考えることは不適切で現象を複合的に捉えるべき、と示唆している。

<アクリル酸>

アクリル系 PSA から未反応物として放出されるアクリル酸は stiction や fly stiction およびヘッド汚れ/付着物のいずれの項目でも障害を誘引¹⁰⁾。同条件で試験した酢酸ではいずれの障害も見えないことや後述のベンゾチアゾールやトリブチルアミンでの観察結果から Jesh らは、化学反応性とトライボケミカルな活性との間には明らかな相関がみられないと報告。また stiction 誘引物質と fly stiction 誘引物質との相関もみられない。

Segar ら¹²⁾は 17 種類のアクリル系 PSA の stiction、耐磨耗性、およびヘッド汚れ/付着物への影響を Z-DOL コートディスクについて調べ、いずれも障害ありと報告している。また Smallen ら¹³⁾は、次の蔞酸の項で示す方法でアクリル系 PAS のモノマーとして用いられるトリエチレングリコールジメタクリレートと光重合開始剤として用いられる 2,2 ジメトキシ 2 フェニルアセトフェノンがディスク上で徐々に重合して stiction を惹き起こすと報告している。腐食はみられない。

<蔞酸>

グリースの分解生成物である蔞酸について、Smallen ら¹³⁾はディップコーティングによりディスク上にあらかじめ付着させ、市販 CSS テスターを用いて stiction の CSS 回数依存やヘッド・ディスクへの影響を調べ、stiction と同時にヘッドのポールチップとディスクの腐食が起こると報告。同時に調査した DOP や後述するその他の化合物では腐食は見出されない。

<その他>

ベンゾチアゾール：添加剤/変性物として散見され stiction および fly stiction 誘引¹⁰⁾。

トリブチルアミン：触媒等添加剤で用いられ fly stiction およびヘッド汚れ/付着¹⁰⁾。

ジアゼピン：ガasket に使用されていたウレタンの合成触媒で粘着障害¹⁴⁾。

セベシン酸ジオクチル：防錆剤として使用され前述の CSS 後 stiction で障害あるも腐食はみられない¹³⁾。

潤滑剤：ディスクの潤滑剤が HDI に集積して fly stiction (浮上不安定)になることが Gui ら¹⁵⁾ や Gao ら⁸⁾により報告されている。

加工油：スピンドルモーターのハブの仕上げ加工の機械油がディスク表面を移動して粘着に至る例を Mee ら¹⁴⁾が NVR 起因障害として挙げている。

この他にも 1998 年の IDEMA STANDARD M3-98¹⁶⁾によれば

安息香酸、

2 エチルヘキサノイン酸、

エルカアミド(C₂₂H₄₃NO、cis13 ドコセン酸アミド)、

スチレンや一般にアミン/アミド、

シリコーン(Silicone：オルガノポリシロキサン類の総称、PDMS より遥かに広義、Si(シリコン Silicon と混同しないよう注意が必要)系鑄造用剥離剤・潤滑剤・粘着剤、

有機スズ系重合触媒・防蝕剤、

二重結合含有(Vinyls)包装フィルム、

含硫黄化合物系架橋剤・増感剤、

が障害起因物として、証明された、ないしは、疑いあるもの、としてリストアップされている。

有機系アウトガスは、シックハウスやクリーンルーム環境の報告例を引用するまでもなく有機化

合物製品の恩恵を蒙っている現代の人間社会の環境下では、検出できるか否かは別として、「必ず存在する」と考えておくべきである。HDD においても、「有機系アウトガスをなくす」ということは出来ない。現在の手持ちの検出手段で見えないレベルに減少させることが出来るだけである。また、Karis ら¹⁷⁾が指摘するようにスライダーサイズと浮上高さが小になればそれまで注目されなかったレベルのコンタミが問題となりうる。HDI の物理的・化学的挙動に及ぼす影響は、これらの報告からみた範囲ではヘッド・ディスク及びドライブの個別の組み合わせにより異なり一般論では閾値をまだ決められず個別に検討せざるを得ないのが現状のように見受けられる。

2. コンタミネーションの検出 コンタミネーションの背景

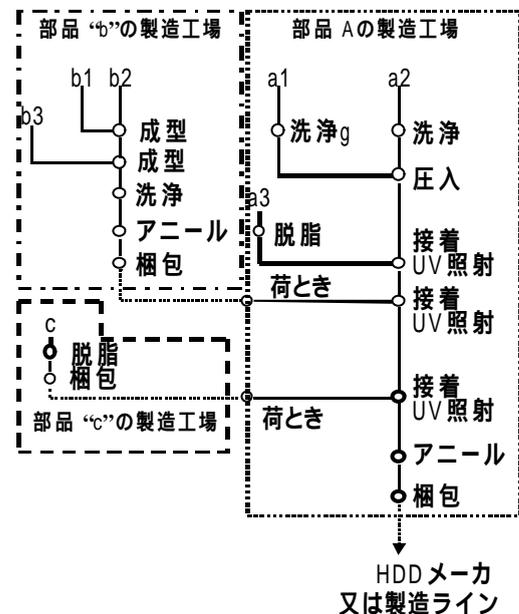
部品からのアウトガスチェックや HDI で検出された汚れ/付着成分の分析では成分の同定と定量とが必要となる。有機系コンタミの分析では一般に FT-IR、GC/MS、TOF-SIMS が分析対象や目的により使い分けられている。コンタミ関連の分析では極微量の試料での分析を強いられることが多く、その点では TOF-SIMS の感度が優れているが¹⁸⁾、ガスの定量性の面からは GC/MS が、また官能基に着目した同定には FT-IR が優れており組み合わせ使用できることが望ましい。

GC/MS の分析ではサンプルからのアウトガスをダイナミックヘッドスペースないしはスタティックヘッドスペースサンプラー中で加熱して採取するが、Schnabel ら¹⁸⁾が指摘するように HDD でのガス放出機構を基本的に変えない加速条件で捕集すべきである。サンプリング時間短縮やより高温でアウトガスが少なければ安心と、加熱温度を高め設定するのは注意した方がよい。TOF-SIMS ではサンプルが高真空に曝される¹⁸⁾ことも頭に入れておく必要がある。なお、有機化合物の分析でよく用いられる NMR は、分析必要試料量が多いため用いられた例はみあたらない。

これらの分析方法の詳細は成書にゆずり、効率的に分析を進める上で必要と思われるアウトガス/コンタミネーションの由来についてまとめておく。分析は分析依頼書にかかれた条件と目的に従い、製造現場や障害解析現場と分離して分析に専心する、というのも一つの考え方であるが、装置および熟練分析者のリソースの有効利用という点からみると、前処理方法や抜き取りサンプル数、異なる性状のサンプルの分析順などの決定を分析側に任せると高品質の分析を限られた時間で遂行するのは無理であろう。分析者は HDD の組み立てや部品の材料と製造に熟知しているべきである。なお、スタティックおよびダイナミックヘッドスペースサンプリング GC/MS の測定法において通常気が付きにくい留意点については既報にまとめてあるので参照されたい^{4,19)}。

HDD の組立て/部品製造工程や部品のコンタミネーションの由来を表 1 にまとめて示す⁴⁾。これからわかるように有機系のアウトガスは至るところに発生源があり汚染の可能性は非常に大きい。また、DOP のように殆ど全ての場所で検出されてもおかしくない物質について今中が分析用のシャーレーなどをアルミホイルで覆った上蓋付きのステンレス製バケツに保管するなどの分析における詳細な注意を述べている⁹⁾が、分析サンプルの取り扱いは全てこれに準ずるくらいの注意深さがないと意味をなさなくなる。分析対象のサンプルを作業現場や製造現場から抜き出す時には分析者自身が行って、分析する場所まで運搬するか、分析を熟知した者が分析者に渡すまでサンプルを管理すべきである。

さらに、HDD の部品は通常リスク回避と安定供給を企図して複数の部品メーカーにまたがったり複数のラインで製造される。原料は原料メーカーから納入され、製造工程のうちいくつかの工程が専門の別組織で行われる場合もある。



a1, a2, a3, b1, b2, b3 及び c : 部品 A の部品。
b1, b2, b3 及び c は部品 A の製造工場に送られる前にそれぞれ製造メーカー又は製造ラインで製造される。

図 1 部品製造工程の模式図

表1 HDD 組み立て・部品製造におけるコンタミネーション要因一覧

工程・材料・部品	コンタミネーション過程	機能的材料	アウトガス例
鋳造・鍛造	鋳型から鋳物表面へ接触移行	シリコン等の剥離剤成分とその熱変性物	シリコンオイル、PDMS
切削・研磨	工作機械油の付着や治工具からの接触移着	切削油・研磨剤懸濁液・添加剤・分散剤	炭化水素
洗浄	洗浄剤成分等の間隙や孔への染み込み・吸着	洗浄溶剤、界面活性剤	ハロゲン化炭化水素、ポリアルコールエーテル・エステル
加熱処理(熱硬化・アウトガス低減処理等)	炉のガスケット及び炉壁付着物由来のアウトガス吸着	未反応モノマー・重合開始剤・添加剤・発泡剤・溶剤	PDMS
加工共通	治工具や台座に付着した油等の接触移着	静電防止剤、洗浄剤	ハロゲン化炭化水素、ポリアルコールエーテル・エステル、PDMS
搬送・輸送	梱包材内表面やトレイからの接触移着	静電防止剤	PDMS
工程待ち	クリーンルームや作業場の室内空気より付着・吸着	クリーンルームや作業室の建築資材および作業場所に共存している物品からのアウトガス	脂肪族/芳香族炭化水素・含酸素化合物・アミン・シリコン・脂肪族/芳香族ハロゲン化合物など一般室内・クリーンルーム環境で見出される VOC
ポリマー製品/ガスケット/FPC/クラッシュストップ/コネクタ	アウトガス発生	未反応モノマー、残留反応副生物、添加剤(可塑剤、酸化防止剤・難燃剤・整泡剤等)	アクリル酸/アクリル酸エステル、フタル酸エステル、アミン、フェノール、有機りん酸塩
接着剤(熱硬化・UV)粘着テープ(PSA)	硬化時および製品化後のアウトガス、	未反応モノマー、触媒、重合開始剤、剥離剤	アクリル酸・アクリル酸エステル、有機スズ、シリコン
グリース	アウトガス、表面拡散移動	未反応原料、低分子量分、酸化防止剤	炭化水素、アミン
磁性流体	アウトガス、表面拡散移動	低分子量成分	炭化水素
電着塗装等コーティング	アウトガス	未硬化モノマー、触媒	溶剤、有機スズ

図1は一つのアセンブリがドライブの組立工程に投入されるまでを模式的に示したもので、破線で囲ってある部分は別の加工ライン又は部品メーカーや単工程の処理業者で加工等が行われることを意味している。具体例に沿っているわけではないので、実際のアセンブリからみれば簡略化しすぎたり複雑すぎる場合もある。問題は、破線で囲った部分から次の破線で囲った部分へ、部品をトレイにいれ包装し、場合によっては国境を越えて輸送されることもある、ということである。工程ラインが異なれば、部品と接触する治工具が異なるのは勿論、仕様で同一洗浄剤を使用している、専門メーカーや処理業者では他の製品との共用洗浄槽しか用意出来ない場合があり、1つのアセンブリーに対して部品メーカー数、構成部品数とそれぞれの工程数、流通経路数等を掛け合わせた数のアウトガスコンタミネーション源が最大存在することになる。

従って製造工程のコンタミネーション制御においては、製造開始段階でも、不幸にして量産中に部品の製造工程起因と疑われるコンタミネーションが問題となった場合でも、製造現場に入るまでの工程の流れが原料に向かって複数枝分かれして扇形に広がっていることを常に視野に入れておく必要がある。特に分析を担当する場合、サンプル量が鼠算的に増えかねないのでリソースと手段とを睨んで方法やサンプリングを考える必要がある。勿論、個々の工程流れはコンタミに対する脆弱性がそれぞれ異なるので、一律には決められない。分析担当者、或いは分析対象と数を決定する責任者が現場をみているかいないかで決定は大きく異なる筈である。次項でも述べるが、分析の効率化のために現場をみることは必須事項なのである。

3. コンタミネーションの低減のために

以上のべたように、部品の製造工程が複数のメーカーに、場合によっては複数の国や地域にまたがるため、コンタミネーションの低減においては HDD 製造メーカーはもとより、部品メーカーや原料メーカーまでの、製品にかかわる全工程に関係する部署でコンタミネーションに関する知見を共有し認識を高めておく必要がある。製品における化学物質に着目して機能性材料・部品の分析/設計を行い、それを源流から下流まで知らしめることをケミカルインテグレーションと呼ぶ場合が多いようであるが、この観点から Nebenzahl ら²⁰⁾はコンタミネーションのドライブ性能に及ぼす影響やケミカルインテグレーションの方法論、コンタミネーションの制御工数の低減、部品レベルやドライブレベルでのテストについて、事象を一般化して詳細に論じ、ドライブで達成されるべきいわゆるハードディスクとしての性能向上のために、惹き起こされかねない材料のコンタミネーションに対する脆弱性の増大を把握すること、清浄度アップとコンタミネーション制御工数の低減の同時進行、清浄度評価方法と部品仕様の整合性と明確化等の重要性を指摘している。

コンタミネーションの制御・低減にあたって仕様を作成する場合、IDEMA(国際ディスクドライブ協会)の STANDARDS¹⁶⁾として Microcontamination に関するものが現在 M-1 から M-13 まで 12(M-12 はみあたらない)用意されており参考にされたい。M2-98 には HDD の部品の用語と材料、コンタミネーション制御における留意点が、M3-98 にはコンタミネーションの種類とドライブ性能への影響が一覧表と共に、また M5-98 にはコンタミネーションの移着機構について述べるときの用語の定義が記載されている。また M7-98 には NVR 測定の方法が、M8-98 にはスタティックヘッドスペースサンプリング GC/MS のモデル操作方法が、M11-99 にはダイナミックヘッドスペースサンプリング GC/MS のモデル操作方法が記述されている。これらの操作方は「わかりやすく具体的に示すための」モデル的性格をもつものと理解するべきで分析の仕様の作成に当たっては個別の装置や状況(汎用機か専用機かなど)を注意深く考慮すべきであろう。測定精度・感度の維持と装置あたりの分析のスループット向上を両立させる管理が望まれる。

製造ラインやクリーンルームのアウトガス関連の評価については(社)日本空気清浄協会から出されている「クリーンルーム構成材料から発生する分子状汚染物質の測定方法指針」²¹⁾も参照されたい。この中にはシリコンウエーハを加熱して吸着物を脱離・捕捉して分析する方法も含まれておりディスク吸着物質の測定にも応用可能である。また吉岡²²⁾がコンタミと分析方法を一覧表にしているので参考にされたい。

HDD 製造の現場で行われているコンタミネーションの試験には分析試料を調製して目視で試験し、同定分析は必要に応じて行うものもある。HAZE 試験²²⁾や銅板腐食試験²³⁾などがこれに属する。前者では部品や材料をディスクと距離をかえて設置し、温湿度を制御して一定時間放置後のディスク表面に曇りがみられるかどうかで評価、後者では主として硫黄系化合物の腐食性をチェックする為、表面を研磨した銅板と非接触で密閉空間に放置し銅表面が黒化しているかどうかで評価する。分析は異常発生時ないしは必要に応じ、予想される物質に対して効果的と思われる手法で行う。

HDI を清浄に保ち HDD の信頼性を保証するためのコンタミネーション低減にとって開発時の新規材質・部品のスクリーニングや量産での部品・材料レベルでの受け入れ検査の重要性は増大する一方であり、2 で述べたように部品を原料まで遡ってコンタミ原因を調査するとなればサンプル数が膨大な量になると予想されるが、それに対応して分析設備や要員を増加し続けることはコスト面からも現実的ではないと考えられる。それでなくても、清浄度の要求レベルがあがれば当然分析の精度と感度の向上が要求され、その分装置の更新や熟練度の向上が要求される。

むしろ簡便法を開発し分析時間の短縮と省力化を行って、重要度により簡便法と従来分析法を適用し、より多量のサンプルを処理できる方向を模索することも大切であろう。

分析の短縮にはアウトガスの捕捉という前処理部分と分析自体(特に GC/MS)とにわけられよう。シックハウス対策を念頭において栗原ら²⁴⁾はパイロフォイルで細かく裁断した試料を過熱し高周波誘導加熱して発生したガスを検知管に導き簡易定性分析する方法を提案している。試料量や感度、それに前述したアウトガス発生機構が HDD 内での使用条件と変わらないかという検討すべき問題は多いが検討には値すると思われる。筆者は第 22 回の本セミナーで布状活性炭にアウトガスを捕捉しパイロフォイルで包んで高周波誘導過熱により GC/MS へ導入する半定量方法²⁵⁾を紹介した。布状活性炭の mm オーダーでの吸脱着性能の均一性や個別の化学種の熱脱着時の変性の有無など

厳密な分析のためには確認すべき点があるがパイロフォイルの自動投入装置を使用すれば、GC/MS の分析サイクルのみで連続的に分析が可能である。これらは簡易分析法の一例でいろいろな簡便法が開発されることを期待したい。

最後に HDD 内部の最終的なコンタミ制御は Fowler ら²⁾が報告しているように活性炭を用いることになろうが空気がフィルターを確実に通過するように設計しないと吸着速度が遅くなるので注意が必要である。

おわりに

以上 HDD における有機系アウトガスについて報告されている化学種、コンタミネーションの背景および低減のための仕様と考え方を紹介してきた。本稿では微粒子はとりあげていないが、シロキサンや DOP 等の UV によるガス 粒子変換²⁶⁾、或いは気象でいう雲凝集核(CCN)のような微粒子 液体のナノ粒子のディスクへの付着が粘着へ及ぼす影響¹⁷⁾など粒子とガスの境界領域の問題が顕在化している。ヘッド/ディスク間が数十 nm という活性炭のマクロ孔からメソ孔のようなサイズでスムーズに相対運動できる HDI を実現する一助に本稿が役立てば幸いである。

謝辞 本稿は筆者が(株)日立製作所ストレージシステム事業部(現日立グローバルシステムテクノロジー)在籍中に得た知見に基づくところが大きい。共に信頼性設計や分析に関わった方々に深く感謝いたします。また最新の信頼性関連資料を提供いただいた信州大学川久保洋一教授にも感謝いたします。

文献

- 1)堀内、*IDEMA JAPAN NEWS* No56 1 (2003) (<http://www.idema.or.jp/news/52.pdf>)
- 2)D.E.Fowler, R.Duque, T. Anokin and J.Zhou, *IEEE Trans. Mag.*, **39** 769 (2003)
- 3)D.Frost and Y.Mehmandoust, *INSIGHT*, July/August 2000 34 (2000)
- 4)勝本、*日本応用磁気学会誌*, **24** 1119 (2000)
- 5)V.Raman, D.Gillis and R.Wolter, *Trans. ASME***122** 444 (2000)
- 6)J.Xu, H.Tokisue, H.Tanaka and M.Matsumoto, *Microsystem Tech.***9** 250 (2003)
- 7)D.E.Fowler and R.H.Geiss, *IEEE Trans.Mag.*, **36** 133 (2000)
- 8)C.Gao, P.Dai and V.Vu, *J. Tribology* **121** 97 (1999)
- 9)今中、*ぶんせき* **2001** 366 (2001)
- 10)M.S.Jesh and P.R.Segar, *Tribology Trans.*, **42** 310 (1999)
- 11)R.Koka, *Microcontamination.*, **11** Sept/Oct 41 (1993)
- 12)P.R.Segar and M.S.Jesh, *J.Info.Storage Proc. Syst.*, **1** 125 (1999)
- 13)M.J.Smallen and P.B.Mee, *ibid.*, **1** 265 (1999)
- 14)P.E.Mee, M.Smallen and D.Wallace, *Datatech* edition2, 39
(http://www.semiconductorfabtech.com/olddatatech/downloads/02_039.pdf)
- 15)J.Gui and B.Marchon, *IEEE Trans. Mag.*, **34** 1804 (1998)
- 16)*IDEMA STANDARDS* Microcontamination DocumentM1-98
(<http://www.idema.org/i4a/pages/index.cfm?pageid=1>)
- 17)T.E.Karis and U.V.Nayak, *Proc. 2003 STLE/ASME Joint Intern. Trib. Conf.*, 2003-TRIB-063 (2003)
- 18)P.H.Schnabel, P.M.Lindley, D.Nehrkorn and M.Kendall *Semicond.Fabtech* 11th Edition 123 (2000) (http://www.semiconductorfabtech.com/journals/edition11/download/ft11-4_02.pdf)
- 19)勝本、*マテリアルステージ* **3** 47 (2003)
- 20)L.Nebenzahl, R.Nagarajan, J.S.Wong, L.Volpe and G.Whitney *J. of the IEST* **41** 31 (1998)
- 21)(案)は *空気清浄* **37**(2) 2-47(1999) に掲載
- 22)吉岡 *IDEMA JAPAN NEWS* No.26, 2 (1998)
- 23)T.MacDonald *Datatch* edition5 45
(http://www.semiconductorfabtech.com /datatech/journals/edition5/downloads/dt5_45_49.pdf)
- 24)栗原、田上、東海林、*BUNSEKI KAGAKU* **49** 201 (2000)
- 25)勝本、*第 21,22 回 JAI セミナー予稿* 17 (1996)
- 26)関口、坂本、石谷、藤井 *第 51 回空気清浄とコンタミネーションコントロール研究大会予稿集* 315 (1997)