

ハードディスク基板表面上の波状欠陥検査技術の開発

針山 達雄*・笹澤 秀明*・吉田 実*・石黒 隆之**・芹川 滋**

* (株)日立製作所 研究開発グループ生産イノベーションセンタ 〒244-0817 神奈川県戸塚区吉田町 292 番地

** (株)日立ハイテクファインシステムズ 〒369-0395 埼玉県児玉郡上里町嘉美 1600 番地

Development of Wavy Defect Inspection Technique for Hard Disk Surface

Tatsuo HARIYAMA*, Hideaki SASAZAWA*, Minoru YOSHIDA*, Takayuki ISHIGURO** and Shigeru SERIKAWA**

*Hitachi, Ltd., Research & Development Group, Center for Technology Innovation-Production Engineering, 292 Yoshida-cho, Totsuka-ku, Yokohama-shi, Kanagawa 244-0817

**Hitachi High-Tech Fine Systems Corporation, 1600 Yoshimi, Kamizato-cho, Kodama-gun, Saitama 369-0395

A new method is proposed for inspecting low-aspect wavy defect on disk surface. The defect disturbs flying height stability of magnetic head in hard disk drive. The defect is detected by using the optical sensor signal that is received when laser irradiates the disk surface. In this paper, first, signal response for wavy defect is quantified by using an optical simulation. Second, image processing algorithm which is based on 2D feature (linearity, cyclic nature) of the defect is proposed and applied to sample images. The experimental result shows that it is possible to detect wavy defects whose height is over 0.3 nm and cycle is about 180 μm .

Key words: HDD, image processing, wavy defect, optical simulation, surface inspection

1. 緒 言

1956年に世界初のハードディスク装置 (hard disk drive, 以下HDDとよぶ)が開発されて以来, HDDは高密度・大容量化, 高速化, 小型化の歴史を経てきた¹⁾. HDDは, 高速回転する磁気ディスク媒体に磁気ヘッドが非接触かつ微小な間隔で浮上しながら, 磁気的に信号を読み書きしている. 近年では面記録密度が数百 Gb/in² (1インチ四方に記録できるビット数)を超え, それに伴い, ヘッドの浮上量も10 nmを下回るレベルとなっている²⁾. ヘッドを安定浮上させるためにはディスクの平坦性が必要であり^{3,4)}, ディスク表面検査装置に対する検査感度の要求も高まっている.

ディスク表面検査では, 異物やスクラッチ等の微小欠陥や, ヘッド浮上量以上の高さ変化をもつ緩やかな凹凸等の低アスペクト欠陥を対象としている. これらの欠陥は, ヘッドのクラッシュや, ディスクへの非追従性の要因となる. 近年, それらに加えて, ヘッドの安定浮上を阻害する周期性のある低アスペクト欠陥 (浮上量以下の高さ変動で, ヘッドの共振周波数に近い周波数)の検査が求められ

ている. このような周期欠陥は波状欠陥とよばれ, 図1に示すように浮上量 (現状7~9 nm)の10%以上の高さ変動をもち, ヘッド・スライダ長 (現状約1 mm)の数分の1程度の周期の欠陥検出が必要となる⁵⁻⁷⁾.

今回われわれは, 検出光学系にて取得した一次元信号から二次元画像を生成し, 生成画像に対し画像処理を適用し, 波状欠陥の検出を行った. 従来, 画像から線状成分を検出する画像処理技術として, 固体撮像素子のすじむらや, 半導体ウェハー上に線状に分布する欠陥に対する適用が報告されている^{8,9)}. しかし, 今回対象とする波状欠陥は他の無欠陥部と比較して画像上の輝度値の差が小さく, 線状成分の抽出だけでは無欠陥部との切り分けが困難である. そこで, 新たに波状欠陥のもうひとつの特徴量である周期性に着目したアルゴリズムの開発を行った.

本論文では, 波状欠陥検査を行うため, 検出光学系に関して, 欠陥形状とその光学応答の関係を光学シミュレーションによって評価し, さらに波状欠陥の特徴量に着目した画像処理アルゴリズムを開発したので報告する.

E-mail: tatsuo.hariyama.zw@hitachi.com

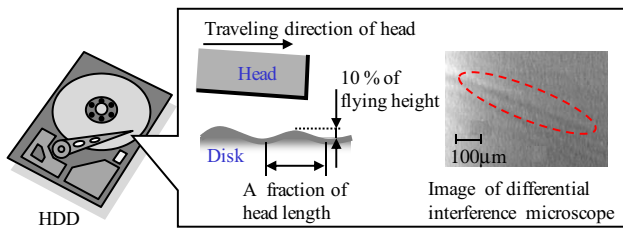


Fig. 1 Feature of low aspect wavy defect.

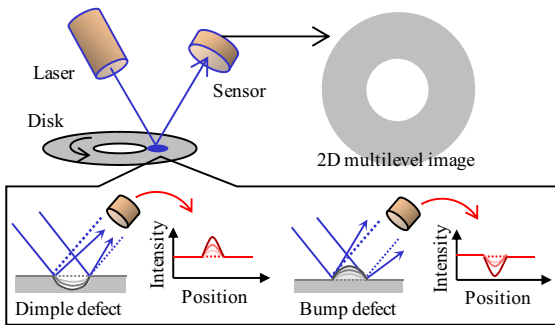


Fig. 2 Optical detecting system.

2. 検出光学系

2.1 検出原理

検出光学系はレーザーをディスク表面に照射し、その正反射光を光センサーによって受光する構成である(図2)。ディスク表面に凹欠陥がある場合、反射光は集光されるため検出強度は増加し、凸欠陥の場合、光は発散するため強度は減少する。レーザーを半径方向に移動させながら、ディスクを回転させて一次元強度信号を検出する。一次元強度信号を並べ替えて、ディスク全面の二次元濃淡画像を得る。

2.2 欠陥形状と光学応答の定量評価

まず、ディスク表面の欠陥形状と、その形状に対する光学応答との関係の定量化を行った。本評価の目的は、生成画像に対するアルゴリズムの設計およびパラメーター設定の指針を明確化することである。本光学系のように表面凹凸を検出強度変化として検出する原理については、文献¹⁰⁻¹²⁾のように、幾何光学に基づく理論解析が行われている。しかし、これらの解析は二次元に限定した解析であり、さらに垂直照明、垂直検出に限定している。今回の評価では、より厳密な解析を行うため、三次元の解析を行い、さらに斜方照明、斜方検出をモデル化する必要がある。そこで、三次元の光学モデルを解析可能である光線追跡シミュレーター CodeV^{*1}を用いて評価を行った。

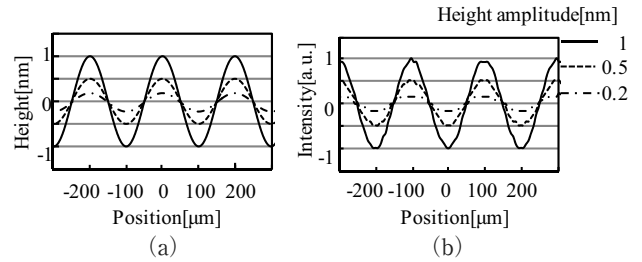


Fig. 3 Optical simulation result of relationship between defect model and detected intensity. (a) Defect model, (b) detected intensity.

光学系のモデルは、図2に示すように、レーザーを集光し、ディスク表面に照射し、その正反射光強度をフォトディテクターによって検出する構成である。ディスク表面上でのスポット径は、対象とする波状欠陥の周期(150~450 µm)と同程度である。また、レーザーとフォトディテクターが干渉しないように、レーザーは斜めから照射する。斜めから照射することでスポット径は楕円形状となるが、短径(150~450 µm)がディスク回転方向を向くように設置する。これは、波状欠陥が発生メカニズム上、ディスク回転方向に周期をもって発生する性質があり、欠陥の周期とスポット径を合わせるためである。ディスク表面に任意形状の欠陥モデルを作成し、ステップ移動させながら検出光強度を計算・取得する。これは回転させながら信号取得することに対応する。

今回、波状欠陥モデルを正弦波形状と仮定した。波状欠陥はディスク製造工程における内部応力から生じ、その発生メカニズム上、正弦波と近似できるためである。ディスク表面に作成した波状欠陥モデルを図3(a)に示す。欠陥の周期は200 µmとし、高さ振幅を1 nm, 0.5 nm, 0.2 nmと変化させたときの解析を行った。本欠陥をステップ移動させながら、CodeVを用いた計算結果から信号を解析した結果を、図3(b)に示す。照射領域の中心位置の欠陥の高さが0 nmのときに検出強度がゼロとなるように、オフセットをかけている。解析結果より、検出信号の周期は、欠陥周期200 µmと一致することがわかる。さらに、図3(a),(b)の比較により、欠陥の凸部に対しては検出強度が減少し、凹部に対しては検出強度が増加するという理論解析^{10,11)}通りの応答も確認できる。また、欠陥の高さ振幅が増加するにつれ、検出強度も増加する傾向にあることが読み取れる。

そこで、欠陥の高さ振幅と検出強度の関係を新たにプ

*1 <http://www.cybernet.co.jp/codev/>

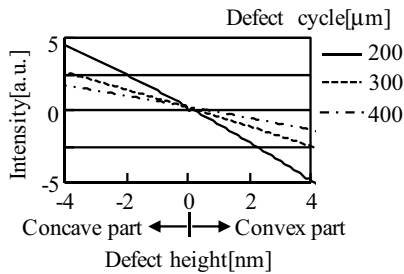


Fig. 4 Optical simulation result of relationship between defect height and detected intensity.

ロットしたものを図4に示す。同図では欠陥の高さ振幅を4 nmまで解析し、さらに欠陥周期300 μm, 400 μmに対して同様の解析を行った結果もプロットした。グラフの右半分は照射領域の中心位置に欠陥凸部が位置した場合の反射光強度であり、グラフの左半分は照射領域の中心位置に欠陥凹部が位置した場合の反射光強度である。同図より、対象とする欠陥の高さ範囲では、欠陥の高さと検出強度とは、欠陥凸部、凹部ともにおおむね線形な関係にあることがわかる。これは、欠陥の高さが増加(減少)するに伴い、欠陥凹凸の曲率(二次微分値)が増加(減少)するため、光の集光および発散の変化量が増加(減少)することによる^{10,11)}。また、欠陥周期が異なる場合、同じ欠陥の高さであっても検出強度に差があることがわかる。これは、同じ高さ振幅であっても、欠陥周期が異なれば欠陥凹凸の曲率が異なるため、光の集光、発散の変化量に差が生じることによる。

以上の解析により、ディスク表面の欠陥形状とその光学応答に関して、対象とする欠陥の高さ範囲では、検出信号の周期は形状の周期と一致し、また検出強度は欠陥凸部、凹部ともに欠陥の高さと線形な関係にあり、さらに欠陥の高さに対する検出強度の変化量の絶対値は凸部と凹部でほぼ一致することを確認した。この関係は、次章にて画像処理アルゴリズムでの二値化閾値を設定する際に、凸部、凹部ともに同じ閾値を設定できることを示唆している。

3. 画像処理アルゴリズム

3.1 アルゴリズムフロー

本章では、検出光学系によって取得された画像から波状欠陥を顕在化させる処理について説明する。波状欠陥の高さ振幅は、ディスク表面の周期数十 μm~数百 μmの粗さ成分の算術平均粗さ W_a (現状 $0.1 \sim 0.2 \text{ nm}^4$) と同程度であり、光学系の特性から検出信号レベルも同様になる。そのため、波状欠陥を顕在化するためには、表面粗さとの分離方法を考える必要がある。そこで、波状欠陥の特徴量

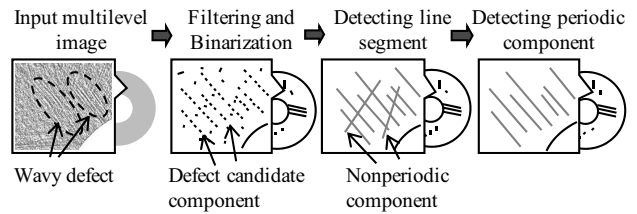


Fig. 5 Algorithm flow.

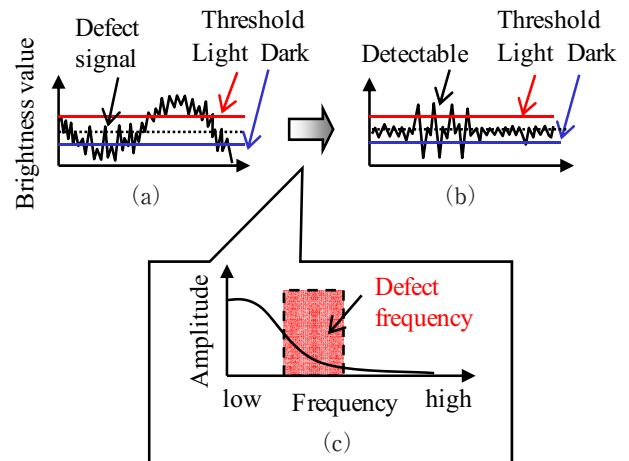


Fig. 6 Concept of filtering and binarization process. (a) Input signal, (b) filtering signal, (c) specification of filter.

(直線性、周期性)に着目し、表面粗さとの分離を目的に、図5に示すアルゴリズムの開発を行った。

入力された濃淡画像に対し、二次元フィルター処理による欠陥周波数帯域の抽出、二値化処理を行い、欠陥候補成分の抽出を行う。欠陥候補成分には欠陥以外に、表面粗さ成分も含まれる場合がある。そこで、続いてハフ変換による直線検出、欠陥の線分特徴量に基づく線分抽出処理を行い、線状に分布すると判定された欠陥成分のみを抽出する。欠陥候補直線成分には周期性のある欠陥以外に、周期性のない線分も含まれる場合がある。そこで、欠陥の周期特徴量に着目した周期性判定処理を行い、最終的に直線性、周期性のある波状欠陥の顕在化を可能とする。以下の節にてそれぞれの処理について詳細を説明する。

3.2 フィルター処理・二値化処理

入力された濃淡画像には、欠陥(周期:ヘッド・スライダー長約1 mmの数分の1)以外の周期成分(ディスク自身のひずみやスピンドル保持によるひずみといった低周波成分や、装置の電気ノイズによる高周波成分)が含まれている。図6(a)は、入力画像を一次元断面観察したときの概念的な信号を表す。欠陥信号以外に、低周波成分(うねり)が重畳している。本信号に対して単純閾値処理をした

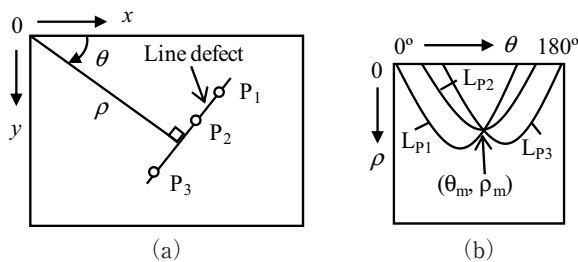


Fig. 7 Principle of Hough transformation. (a) Real space, (b) θ - ρ parameter space.

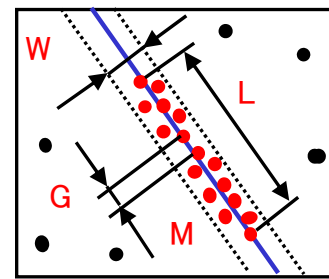


Fig. 8 Line feature quantity.

場合、欠陥信号は抽出されず、欠陥以外のノイズ成分が欠陥候補成分として多数抽出されてしまう。そこで、図6(c)に示すような欠陥帯域のみを通過させるフィルターを設計する。設計したフィルターを適用した画像に対し二値化を行い、欠陥候補成分の抽出を行う。二値化の閾値はフィルター通過後の信号に対して、図6(b)に示すように明(輝度)レベル側と暗(輝度)レベル側にそれぞれ設定する。二値化閾値の設定に関しては、2章で述べたように欠陥の凸部と凹部とでは線形な光学応答が得られることから、明レベル、暗レベルで同じ値とし、その値は、対象とする波状欠陥の高さ振幅および周期に対応する最小の輝度振幅から決定する。

3.3 直線検出処理・線分抽出処理

前節にて二値化された画像には、波状欠陥以外の成分が含まれる。そこで、波状欠陥の特徴である直線成分の抽出を行う。なお、二値化画像は明レベル閾値と暗レベル閾値によって2種類の画像が生成されるが、直線検出、線分抽出処理は明レベル二値化画像に対して行い、暗レベル二値化画像は後の周期性判定処理に用いることとした。

ノイズを含む画像から複数の直線検出を行うために、ハフ変換法を採用した^{8,9)}。図7にハフ変換の原理を示す。図7(a)は実空間(x, y)上の画像であり、図7(b)は θ - ρ パラメータ空間を示す。例えば、3個の点 P_1, P_2, P_3 が一直線上にあるとすれば、その直線方程式は次式となる。

$$\rho = x \cos \theta + y \sin \theta \quad (1)$$

ただし、 ρ は画像の左隅から直線に下ろした垂線の長さであり、 θ は x 軸と垂線とがなす角である。このとき、1つの直線は、図7(b)で示す θ - ρ パラメータ空間上の1点と等価である。対象となる二値画像で値が‘1’である各点(P_1, P_2, P_3)において、式(1)を満足する (θ, ρ) の組を計算し、それをプロットしたのが図7(b)の $L_{p1} \sim L_{p3}$ である。 $L_{p1} \sim L_{p3}$ はただ1点 (θ_m, ρ_m) で交わっており、その点が図7(a)の P_1, P_2, P_3 が構成する直線を表している。いいかえれば、 θ - ρ パラメータ空間上で最も交差回数の多

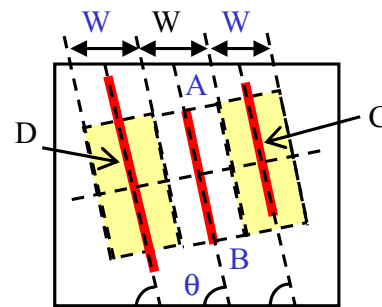


Fig. 9 Periodic determining process.

い点(頻度最大の点 θ_m, ρ_m)を選べば、 (θ_m, ρ_m) が決定する直線が対象画像上で最も支配的な直線成分であることになる。以上の原理に基づき、直線成分の抽出を行う。

次に、検出された直線に対して、欠陥の線分特徴量を用いて、図8に示す欠陥判定を行う。まず、検出された直線に対して幅 W をとり、その範囲に存在する点をその直線を構成する点とする。次に点間の距離 G を求め、閾値 G_t より小さければその点は連続であると見なす。次に、連結した点に対して両端の点間距離 L を求め、閾値 L_t より長ければ、欠陥候補線分とする。さらに、欠陥候補線分に対して、その線分を構成する点をその線分長さで割った値、すなわち線密度 M を求め、閾値 M_t より大きければ欠陥として判定する。以上の処理により、入力画像から直線性のある波状欠陥の顕在化を行う。ここで、各パラメータの設定に関しては、 W は欠陥の周期に関連し、 G_t, M_t はディスク表面粗さ(ノイズ)に関連し、 L_t はヘッド幅に関連して定まるパラメータである。

3.4 周期性判定処理

前節にて抽出された線分には、周期性のある欠陥線分以外に、周期性のない線分も含まれる場合がある。そこで、波状欠陥の周期特徴量を利用して、図9に示す判定処理を行う。抽出された全線分に対して、同図に示すように、着目線分の始点A、終点B、および周期 W で決まる周期領域C、Dに同じ方向 θ を向く線分が存在する場合、周期性があると判定し、欠陥とする。これによって線分間で周期性

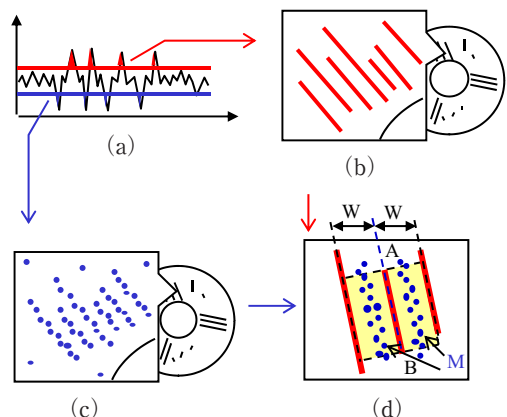


Fig. 10 Periodic determining process by light and dark brightness level. (a) Binarization of light and dark level, (b) binarization image of light level and periodic determining process, (c) binarization image of dark level, (d) periodic determining process.

のあるものだけが残り、周期性のない線分は除去される。

さらに、判定のロバスト性を向上させるために、図10に示す明暗輝度特徴量による周期性判定処理を考案した。図10(a)に示すフィルター処理後、明暗レベルの2種類の二値化画像において、図10(b)に示す明レベル二値化画像に対して線分抽出、周期性判定を行う。ここで、図10(c)に示す暗レベル二値化画像に着目すると、波状欠陥の特徴上、明レベル同様に線分が周期的に存在し、その位置は明レベルの線分間に配置している。そこで、図10(d)に示すように、明レベル二値化画像において、周期性があると判定された線分間の領域に存在する暗レベル二値化画像の線密度 M が閾値 M_t 以上であれば、欠陥として判定する。以上の処理により、最終的に直線性、周期性のある波状欠陥が検出可能となる。

4. 実験評価

実サンプルを用いて、2章で述べた欠陥形状と光学応答との関係の評価を行った。4.1節では三次元形状測定器(白色干渉計)を用いて欠陥形状の解析を行い、4.2節では検出光学系にて取得した画像の解析を行い、両者の比較を行った。

続いて4.3節にて、取得画像に対して開発したアルゴリズムを適用し、アルゴリズムの性能評価を行った。

4.1 評価サンプル形状測定

本評価には、波状欠陥の存在するサンプル2枚(以後、

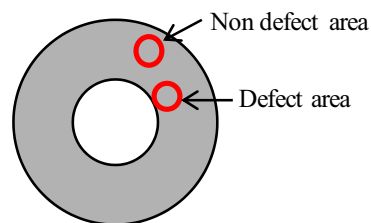


Fig. 11 White light interferometry measurement area of defect sample A.

欠陥サンプルA, Bとよぶ)と波状欠陥の存在しないサンプル1枚(以後、無欠陥サンプルとよぶ)を用いた。サンプルはアルミ基板である。欠陥サンプルAに対しては白色干渉計(Zygo社製NewView, 水平方向分解能 $4.39\mu\text{m}$)にて波状欠陥箇所および無欠陥箇所の測定を行った。白色干渉計は高さ測定精度がオングストロームオーダーと非常に高いため、欠陥形状の真値として評価に用いることとした^{*2}。図11は欠陥サンプルA上の白色干渉計測定箇所を示す。欠陥箇所、無欠陥箇所の白色干渉計測定画像を図12(a), (b)に、またそれぞれの画像に対する周波数スペクトル(振幅成分)を図12(c), (d)に、周波数スペクトル上での断面プロファイルを図12(e), (f)に示す。ここで、図12(e)は図12(c)上の断面AA'の中心O近傍(低周波成分)からA(高周波成分)までのプロファイルを示す。図12(e)の横軸は周波数から換算した周期長さを対数表示させている。同様に、図12(f)は図12(d)上の断面BB'の中心O近傍からBまでのプロファイルを示す。

図12(a)に示す波状欠陥箇所を観察すると、図中の欠陥方向の直線が周期的に存在することが確認できる。周期性を解析した図12(c)の周波数スペクトルにおいて欠陥方向と垂直な方向に直線状のスペクトルが存在することからも、その周期性が確認できる。直線状のスペクトルに対する断面プロファイルOA(図12(e))より、欠陥のピーク周期は $176\mu\text{m}$ であることがわかる。また、図12(a)の平均高さ振幅を求めたところ、約 0.3nm であった。一方、無欠陥箇所である図12(b)では周期的な形状は確認できず、その周波数スペクトル(図12(d))および周波数スペクトルに対する断面プロファイルOB(図12(f))においても、周期成分は確認できなかった。

4.2 検出光学系によるサンプル測定

2章で説明した検出光学系を用いて3サンプルの測定を行った。画像生成の条件として、画素寸法 $30\mu\text{m}$ 角、256

^{*2} レーザー検出方式は高速に検出可能であり、ディスク上の欠陥位置を特定するために用いる。白色干渉計は1回に計測できる範囲が数mmであり、計測に時間を要するため、検出された欠陥位置を詳細解析するために用いる。

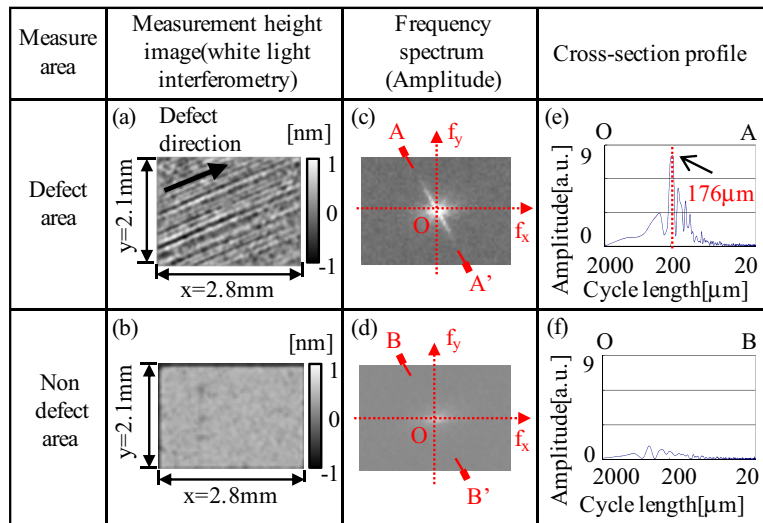


Fig. 12 Analysis of white light interferometry images of sample A.

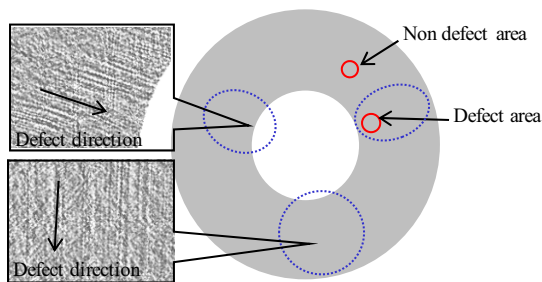


Fig. 13 Whole surface image getting by the optical detecting system.

階調とした。図 13 は欠陥サンプル A に対して取得した画像を示す。破線で囲った領域に周期的な線分が確認され、波状欠陥が認識できる。4.1 節で説明した白色干渉測定結果と本節で取得した画像との関係と比較するため、欠陥箇所

所、無欠陥箇所の拡大図を、それぞれ図 14 (a), (b) に示す。さらに、各画像の周波数スペクトル (振幅分布) を図 14 (c), (d) に示し、周波数スペクトル上での断面プロファイルを図 14 (e), (f) に示す。ここで図 14 (e) は図 14 (c) 上の断面 CC' の中心 O 近傍 (低周波成分) から C (高周波成分) までのプロファイルを示す。ここで、図 14 (e) の横軸は周波数から換算した周期長さを対数表示させている。同様に、図 14 (f) は図 14 (d) 上の断面 DD' の中心 O 近傍から D までのプロファイルを示す。図 14 (a) に示す欠陥箇所の画像より周期的な直線が確認でき、さらに図 14 (c) に示す周波数スペクトルより図 12 (c) と発生方向が一致していることがわかる。また図 14 (e) に示すスペクトル上の断面プロファイル OC より、周期は $187 \mu\text{m}$ で

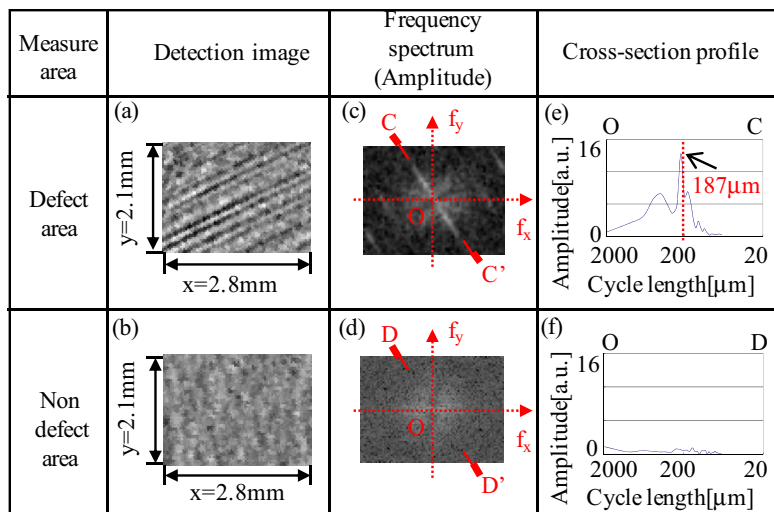


Fig. 14 Analysis of images getting by the optical detecting system.

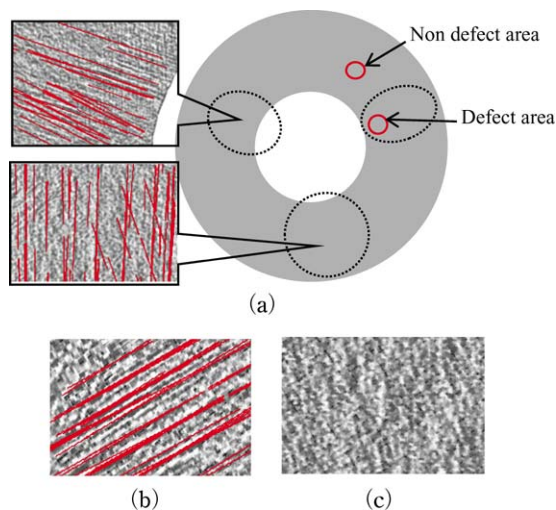


Fig. 15 Result of applying the proposed algorithm to defect sample A. (a) Whole surface image, (b) defect area (same area of Fig. 12 (a)), (c) non-defect area (same area of Fig. 12 (b)).

あり、図 12 (e) とほぼ同等な値である。また無欠陥箇所である図 14 (b) では周期的な欠陥はみられず、図 14 (d) に示す周波数スペクトル、図 14 (f) に示す周波数スペクトルに対する断面プロファイル OD にも特徴的な信号は確認されない。

以上の解析により、検出光学系にてディスク表面上の波状欠陥（高さ振幅 0.3 nm、周期 180 μm ）が目視で認識可能となることを確認した。次に、本データに対して画像処理アルゴリズムを適用し、欠陥検出を行う。

4.3 画像処理アルゴリズム適用結果

4.2 節で生成した画像に対して、処理アルゴリズムの適用を行った。ここで、アルゴリズム中の各パラメーターの設定は、欠陥となりうる条件（ヘッド長の数分の 1 の周期、浮上量の 10% 以上の高さ振幅に対応した輝度振幅）を満たす箇所が顕在化されるように設定を行った。図 15 は欠陥サンプル A に対する処理結果である。図中赤線は欠陥を検出した箇所を示す。図 15 (a) のディスク全面画像において、図 13 にて破線で囲んだ欠陥箇所が検出されており、本アルゴリズムの有効性が確認できる。また、図 15 (b) は白色干渉計にて測定した欠陥箇所（図 14 (a)）に対する結果であり、図 15 (c) は無欠陥箇所（図 14 (b)）に対応する結果である。欠陥箇所のみを検出していることから、本アルゴリズムの有効性が確認できる。

その他のサンプルに対する適用結果を図 16 に示す。図 16 (a) は欠陥サンプル B を示し、図 16 (b) は無欠陥サンプルを示す。アルゴリズム適用の結果、欠陥サンプル B に対しては欠陥の条件を満たす箇所を顕在化していることが

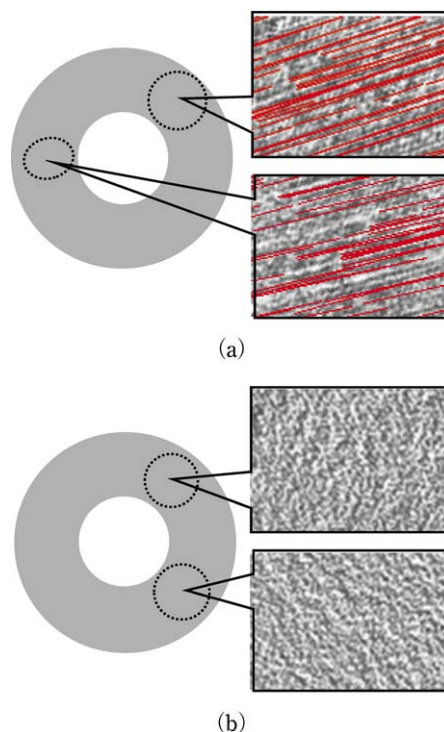


Fig. 16 Results of applying the proposed algorithm to other samples. (a) Defect sample B, (b) non-defect sample.

確認でき、無欠陥サンプルに対しては欠陥が検出されておらず、本アルゴリズムの有効性を確認できた。

5. 結 言

ディスク表面検査装置における低アスペクト・波状欠陥検査を目的に、検出光学系のシミュレーション評価、顕在化アルゴリズムの開発を行い、以下の結論を得た。

- (1) 光学シミュレーションを用いて、検出光学系の評価を行った。解析の結果、ディスク表面の欠陥形状とその光学応答に関して、検出信号の周期は形状の周期と一致し、また検出強度は欠陥の高さと比例することを確認した。
- (2) 検出画像から波状欠陥を顕在化することを目的に、波状欠陥の特徴量（直線性、周期性）に着目した画像処理アルゴリズムの開発を行った。本アルゴリズムはフィルター処理・二値化処理、直線検出・線分抽出処理、周期性判定処理から成り、二値化閾値の設定には光学シミュレーション結果を反映した。
- (3) 開発した画像処理アルゴリズムを実サンプルに適用した結果、平均高さ振幅約 0.3 nm、周期約 180 μm の低アスペクト波状欠陥の顕在化が可能であることを確認した。

今回は HDD の基板を検査対象とし、検出光学系の定量

評価, 画像処理アルゴリズムの開発を行った. 本手法は半導体ウェハー, 鋼板等といった, 鏡面をもつ他分野検査対象に関するでも適用可能と考える.

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 (日経BP, 2000) p. 276.
- 2) 樋口龍治, 森 恭一: “ハードディスク製造装置の展望”, 日立評論, **89**, No. 4 (2007) 60-65.
- 3) 加藤良則, 梅田秀俊, 藤本日出男: “高容量磁気ディスク用アルミニウム基盤の開発と将来展望”, Kobe Steel Engineering Reports, **50**, No. 3 (2000) 50-53.
- 4) 鄭 用一, 西村通徳, 若林秀樹: “アルミポリッシュ基板”, 富士時報, **79** (2006) 297-299.
- 5) V. Ponnaganti, R. Noteboom and A. Eshel: “On non-linear response of head-disk interface to wavy excitation,” IEEE Trans. Magn., **22** (1986) 1008-1010.
- 6) B. H. Thornton, D. B. Bogy and C. S. Bhatia: “The effects of disk morphology on flying-height modulation: Experiment and simulation,” IEEE Trans. Magn., **38** (2002) 107-111.
- 7) A. K. Menon: “Critical requirement for 100 Gb/in² head/media interface,” *Proc. of Symposium Interface Technology Towards 100 Gbit/in²*, Vol. 9 (1999) pp. 1-9.
- 8) 浅野敏郎, 秦 清治, 小石川進, 清水涌一: “固体撮像素子のすじむら自動画質評価”, 電子情報通信学会論文誌 D, **J72-D-2** (1989) 1364-1372.
- 9) 渋谷久恵, 高木祐治, 中川泰夫: “点群分布パターン識別に基づく欠陥分類技術”, 電気学会論文誌 C, **127** (2007) 521-527.
- 10) F. Riesz: “Geometrical optical model of the image formation in Makyoh (magic-mirror) topography,” Appl. Phys., **33** (2000) 3033-3040.
- 11) F. Riesz: “A quantitative approach to Makyoh (magic-mirror) topography,” J. Cryst. Growth, **210** (2000) 370-374.
- 12) F. Riesz and I. E. Lukacs: “Possibilities of quantitative Makyoh topography,” *Advanced Semiconductor Devices and Microsystems* (2000) pp. 215-218.