

北海道大学工学部 ○高谷裕浩、三好隆志、斎藤勝政

1. はじめに

本研究は超精密加工表面におけるサブミクロンオーダーの微細傷を、光の散乱現象を用いて検出し、更に定量的に評価できる手法の開発を目的としている。偶発的に発生する微細な傷の形状には様々なものがあり、柔軟性のある評価手法を開発するためには、理論的に厳密な解析を行なうことができ、しかも任意の微細傷形状モデルに対して適応が可能な解析手法を用いて、微細傷による散乱特性を系統的に調べていく必要がある。そこで本報では、任意の傷形状に対応でき、しかも高い計算精度が得られる境界要素法(Boundary Element Method)による電磁場散乱問題の解析手法を用いて、集光ビームによる微細傷の散乱特性解析シミュレータを開発し、V溝状傷モデルの散乱特性について検討したので報告する。

2. 微細傷散乱特性の解析モデル

本研究では微細傷測定システム光学系として、レーザ光を対物レンズで集光して試料に照射し、傷からの散乱パターンをフーリエ変換レンズによってCCDエリアセンサに結像する光学系を用いており、散乱パターンは入射ビームスポットの状態や傷の大きさや形状の変化に対して敏感に変化する。そこで、入射ビームの状態や散乱体形状を任意に設定するため図1のようにモデル化した。このモデルにおける電磁場散乱問題は以下のように定式化される。

いま、散乱体表面(境界 $\Gamma_c$ )において散乱された散乱波 $u^{sc}_x$ は、領域 $\Omega$ 内において次のヘルムホルツ方程式を満足する。

$$\nabla^2 u_x^{sc} + k^2 u_x^{sc} = 0 \quad (1)$$

さらに、境界 $\Gamma_c$ を完全導体と仮定すると境界条件は $\Gamma_c$ 上において、

$$E \text{ 偏波入射に対して、} \quad u_x^{sc} = -u_x^{in} \quad (2a)$$

$$H \text{ 偏波入射に対して、} \quad \frac{\partial u_x^{sc}}{\partial n} = -\frac{\partial u_x^{in}}{\partial n} \quad (2b)$$

で与えられる。但し、 $\partial/\partial n$ は境界 $\Gamma_c$ における法線方向微分を表わす。散乱波 $u^{sc}_x$ を求める問題は境界条件(2a)と(2b)のもとで(1)を解く問題として定式化される。

3. 境界要素法(BEM)による定式化

電磁波散乱問題へ適応できるヘルムホルツ問題への拡張は驚巢ら<sup>1)</sup>によって行なわれた。その手法を用いた研究として、光メモリスディスクのピットやボスによる散乱特性解析への応用<sup>2)</sup>がいくつか報告されており、本研究ではそれらの手法を微細傷による散乱の解析に用いている。今回開発したシミュレータの基本になっている定式化の概要を以下に示す。

$\Omega$ 内の任意の点*i*に対して成立する積分表現は、

$$u_i + \int_{\Gamma} u_x^{sc} q^* d\Gamma = \int_{\Gamma} q_x^{sc} u^* d\Gamma \quad (3)$$

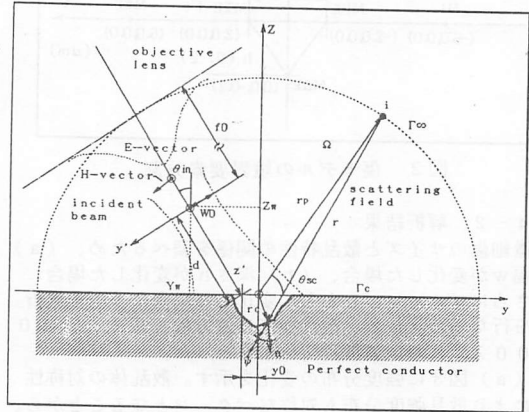


図1 境界要素解析モデルの座標系

となり、すべての内点の値が境界値 $u^{sc}_x, q^{sc}_x$ によって求められる。次に点*i*が限りなく境界 $\Gamma_c$ に近づいたとき、グリーン関数 $u^*$ の特異性を考慮し、さらに、境界 $\Gamma_c$ を*N*個の線形境界要素で離散化すると次式のような行列方程式を得る。

$$H u_x^{sc} = G q_x^{sc} \quad (4)$$

但し、**H**および**G**は*N*×*N*の行列であり、各要素は要素内の $u^{sc}_x, q^{sc}_x$ を線形補間関数を用いて補間し、ハンケル関数の積分を行なうことによって求められる。また、 $u^{sc}_x, q^{sc}_x$ は、E偏波入射の場合は境界条件より $u^{sc}_x$ の要素は境界上での入射成分となる。式(4)により境界 $\Gamma_c$ 上の $u^{sc}_x$ あるいは $q^{sc}_x$ がすべて求められ、 $\Omega$ 内の任意の点*i*の散乱波 $u^{sc}_x$ は同様に式(3)を離散化し、

$$u_{xi}^{sc} = \sum_{j=1}^n G_{ij} q_{xj}^{sc} - \sum_{j=1}^n H_{ij} u_{xj}^{sc} \quad (5)$$

で与えられる。

4. V溝状微細傷の散乱特性解析

トランスペアレント(T800)上で開発したBEMシミュレータを用いて、最も一般的な傷形状であるV溝状微細傷による散乱特性の解析を行なった。

4-1. 傷の境界要素モデル

微細傷モデルの境界分割は、精度上 $\lambda/10$ 以下とし平面部分は $0.04 \mu m$ 、傾斜部は $0.02 \mu m$ で分割してある。図2に要素分割の一例として、幅*w*( $4.0 \mu m$ )、深さ*h*( $0.2 \mu m$ )の場合を示す。要素数は403点(M1~M403)に分割され、境界の打ち切り誤差を抑えるため入射光のビームサイズ $2.0 \mu m$ を考慮し、強度が $10^{-6}$ 以下に減衰するところで打ち切っている。

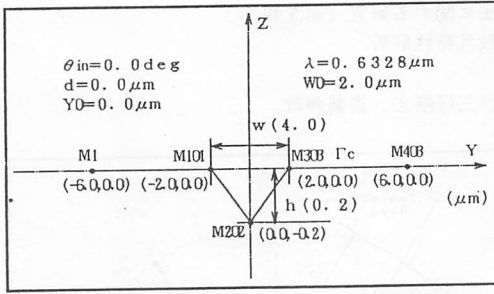


図2 傷モデルの境界要素分割

#### 4-2. 解析結果

微細傷のサイズと散乱特性の関係を調べるため、(a) 幅wが変化した場合、(b) 深さhが変化した場合、さらに(c) w、hともに変化した場合について解析を行なった。なお、散乱強度は遠方散乱界( $r_c = 1000\lambda$ )における散乱角分布をとった。

(a) 図3に強度分布の変化を示す。散乱体の対称性により散乱強度分布も対称なパターンとなることから、散乱角は $0^\circ \sim 90^\circ$ の半分のみを示した。また、表1に散乱パターンのピークの角度と強度の値をまとめた。図4に示すように、ピークの番号は散乱角 $0^\circ$ を①として順に②、③...としてある。図3より、散乱パターンの散乱角分布はほとんど変化していないが、第3ピーク以内にはいる中心付近の強度の大きさが幅の増大と共に大きくなっている。

(b) 図4より、深さの変化に対して、散乱強度は敏感に変化するの分かる。表1から、特に第2ピークの強度には2倍以上の変化が見られる。このことから深さについては第2ピークの強度によって評価できることがわかる。

(c) 図5より、傷のサイズが大きくなるにしたがい、ピークの位置が全体的に中央にシフトしている。また、第2ピークなどの著しい強度変化は深さ変化の影響が強く現われているものと考えられる。

以上より、サイズの分かっている傷による散乱強度を基準データ(上記では $w(2.0\mu m)$ 、 $h(0.1\mu m)$ の傷)とし、計測された散乱強度の変化を調べれば傷のサイズがどの様に基準データの傷サイズから変化しているかを推定できることがわかる。なお、今後シミュレータと計測データのマッチングの手法を確立すれば、定量的評価も可能となると考えられる。

#### 5. まとめ

- (1) 境界要素法を用いた、微細傷散乱特性解析シミュレータの開発を行なった。
- (2) V溝状微細傷の散乱特性を解析し、傷サイズと散乱強度パターンの関係を明らかにした。

#### 【参考文献】

- 1) 繁巣、深井: "境界要素法による開放領域問題の解析", 電子情報通信学会論文誌(B)、J61-B、6、pp. 472-478 (昭56)
- 2) 真鍋、宮崎 他: "境界要素法を用いた一般形状の光ディスクビットによるビーム波の近傍散乱界および誘起電流の解析", 電子情報通信学会論文誌(C)、J72-C、2、pp. 86-92 (1989)

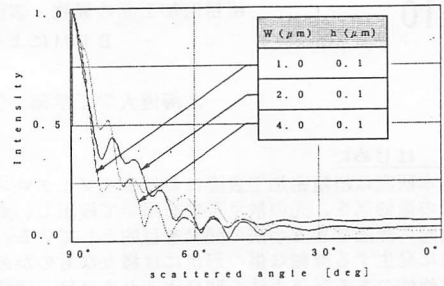


図3 傷幅と散乱強度特性

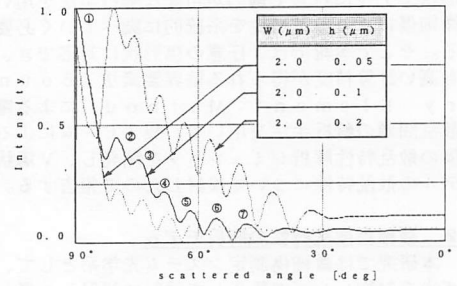


図4 傷深さと散乱強度特性

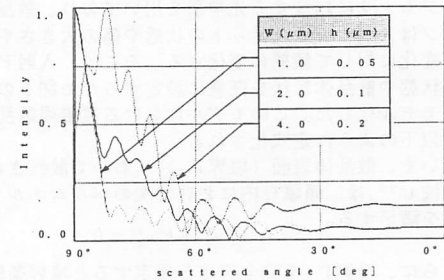


図5 傷幅、傷深さの変化と散乱特性

傷\ピーク	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨
W 2.0 μm	90.0	80.0	74.9	68.5	62.2	55.5	48.4	角度	deg
h 0.1 μm	1.0	0.45	0.35	0.22	0.14	0.1	0.08	強度	
W 1.0 μm	90.0	79.5	73.7	67.4	60.5	53.3	45.6	36.8	
h 0.05 μm	1.0	0.15	0.15	0.13	0.11	0.09	0.08	0.08	
W 4.0 μm	90.0	86.6	82.1	77.0	71.8	65.6	58.5	50.6	42.6
h 0.2 μm	0.49	0.76	1.0	0.73	0.54	0.3	0.18	0.18	0.16
W 1.0 μm	90.0	80.8	75.6	69.3	62.7	55.8	48.4	39.9	29.7
h 0.1 μm	1.0	0.24	0.27	0.24	0.19	0.15	0.11	0.08	0.05
W 4.0 μm	90.0	81.2	75.9	69.9	62.7	55.8	48.6		
h 0.1 μm	1.0	0.52	0.28	0.15	0.09	0.09	0.08		
W 2.0 μm	90.0	79.8	74.1	67.8	61.7	55.0			
h 0.05 μm	1.0	0.23	0.18	0.12	0.08	0.06			
W 2.0 μm	90.0	80.8	75.0	69.8	63.7	57.3	50.2	42.3	
h 0.2 μm	0.85	1.0	0.88	0.63	0.51	0.44	0.33	0.21	

表1 散乱ピークの角度と強度データ