

2014 年度 学位論文

光学式表面性状測定機を対象とした応答特性の
評価法及び輪郭形状の計測限界に関する研究

長岡技術科学大学 大学院

情報・制御工学専攻 藤井章弘

目次

第1章 序論	1
1.1 はじめに	1
1.2 国際標準化の動向	5
1.2.1 表面性状の図示方法	7
1.2.2 三次元表面性状パラメータ	8
1.2.3 表面性状評価のための前処理	10
1.2.4 測定条件, 解析条件	12
1.3 測定法及び測定機の分類	14
1.4 座標系に注目した場合の測定機の分類	15
1.5 座標系の校正とそれに用いる標準片	17
1.5.1 X,Y 軸座標系	17
1.5.2 Z 軸座標系	18
1.5.3 直角度	19
1.5.4 平面度	20
1.6 表面凹凸に対するセンシング特性の評価方法と研究動向	21
1.6.1 測定ノイズ	21
1.6.2 空間波長検出限界	22
1.6.3 最大局所傾斜角	24
1.6.4 総合点検	26
1.7 光学式測定機の抱える課題	27
1.7.1 異機種間の測定データの差異	27
1.7.2 異常値問題	29
1.7.3 異常値への対処	32
1.8 本研究の目的	34
1.9 本論文の構成と概要	35
参考文献	38

第2章 表面波長に対する振幅の応答特性の実測 -----	41
2.1 表面波長と振幅の応答の関連 -----	41
2.1.1 評価の対象とした測定機および測定標本 -----	41
2.1.2 測定結果 -----	43
2.1.3 表面波長に対する振幅の応答 -----	46
2.2 解析波長帯を統一した比較 -----	48
2.3 まとめ -----	51
参考文献 -----	52
 第3章 ベクトルシミュレーション手法の開発 -----	 53
3.1 スカラー解析とベクトル解析 -----	53
3.2 シミュレーション手順の概要と数値解析モデル -----	53
3.3 FDTD 演算空間 -----	56
3.4 集光スポット（初期電場）の照射 -----	57
3.4.1 ベクトル回折理論 -----	57
3.4.2 スカラー回折理論との比較 -----	61
3.5 FDTD 法による散乱光分布の計算 -----	65
3.5.1 マクスウェル方程式と差分法 -----	65
3.5.2 離散時間 Δt の設定 -----	67
3.5.3 境界条件 -----	68
3.6 光検出強度の計算 -----	72
3.7 表面位置の検出 -----	72
3.8 シミュレーション諸条件 -----	73
3.9 実測との比較によるシミュレーション結果の妥当性検証 -----	74
3.10 まとめ -----	76
参考文献 -----	77

第4章 標本の基本形状に対する応答特性の数値解析	78
4.1 集光スポット内部の局所形状の分類	78
4.2 傾斜平面に対する応答	78
4.3 正弦波状断面に対する応答	80
4.4 エッジ状断面に対する応答	85
4.4.1 矩形波状断面の場合	85
4.4.2 三角波状断面の場合	88
4.5 空間波長検出限界の検定用標準片に関する考察	89
4.6 測定標準面の設計指針	93
4.6.1 傾斜平面	93
4.6.2 正弦波状断面	93
4.6.3 エッジ状断面	93
4.7 まとめ	95
参考文献	96
 第5章 空間波長検出限界の検定を目指した新しい標準片の開発	 97
5.1 標準片の設計方針	97
5.2 振幅変調型チャープ波形モデルの設計	98
5.2.1 測定標準面の設計と数式モデル	98
5.2.2 設計パラメータ	101
5.3 FIB 加工を用いた実標本の製作	103
5.4 様々な光学式測定機の応答特性の評価例	106
5.5 空間波長検出限界の検定方法に関する一提案	117
5.6 まとめ	120
参考文献	121

第 6 章 総括	122
----------	-----

謝辞

第1章 序論

本章では最初に光学式表面性状測定機の有用性を説き，これらを用いた三次元表面性状の計測方法に関する ISO（国際標準化機構）規格の動向についてまとめる．次に，測定座標系の構成要素に注目して各種測定原理の測定機を分類し，座標系の持つ誤差要因について考察する．また測定機を校正するための測定標準面（標準片）についても述べる．最後に，光学式表面性状測定機の抱える課題を提示すると共に，これに関する幾つかの研究事例を紹介した上で，本論文の目的について述べる．

1.1 はじめに

工業製品の高度化に伴って製品を構成する個々の部品の表面には高度な機能性が要求されるようになってきている．例えば自動車のエンジンのシリンダの表面には潤滑油保持のための油溜まり溝を付けたり，摺動抵抗を制御するための微細凹凸を意図的に付与してエネルギー効率の向上と高寿命化を図っている．またハードディスクに用いる動圧軸受けでは，回転軸表面に設けた流体溝によって潤滑流体に圧力を発生させ，この圧力で回転負荷を支持することで運動の高速化，高精度化を実現している．ここに挙げたような機械的な機能以外にも接触抵抗などの電氣的機能や，反射・散乱光といった光学的あるいは外観デザインに関連する機能といったように部品には様々な機能が与えられる．このような表面機能の品質を管理するためには，部品の表面の幾何学的な形状を正しく測定し，これを定量化することがますます重要となってきている．

ISO（国際標準化機構）では部品の幾何的な特性に関わる全ての規格を図 1.1 に示すように分類，体系化している[1]．この分類は GPS(Geometrical product specification：製品の幾何特性仕様)マトリックスと呼ばれる．縦に並ぶ項目は幾何形状を分類したものであり，横に並ぶ項目は製図，製造，測定，評価といった最終製品の完成までのプロセスで必要となる規格の性質と用途を表している．部品調達先のグローバル化に伴い，GSP マトリックス上で位置付けされた国際規格に則って図面指示や幾何特性の評価，および合否判定を行うことが主流となっている．当然ながら，ここでの規格は商取引上でも利用されるため，訴

訟問題などを引き起こさないようにあいまい性や不明瞭な点があってはならない。ISO では GPS マトリックス上の全ての規格を明確にすることを目指し、その制定・改定を推進している。

本論文では、表面機能と密接に関連する GPS マトリックス中の”Surface texture (表面性状)”に焦点を当てる。

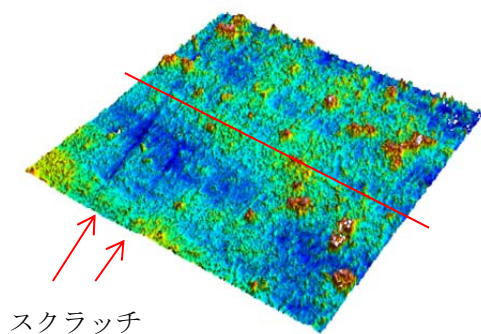
表面性状を信頼性高く測定する方法として触針式表面粗さ測定機[2]が古くから広く利用されている。この方法は ISO 規格においては”Line profiling method”と呼ばれ[3]、それが XZ 平面内の二次元的な輪郭データであることから JIS 規格（日本工業規格）[2]では「輪郭曲線方式」と和訳された。これに関連する測定条件や校正方法、標準片といった一連の JIS 規格[4]-[13]も完備している。輪郭曲線方式は機械的な触針先端で測定対象物の固体表面を精密になぞるため信頼性の高いデータ取得が可能である。また、測定軸（通常は X 軸）方向に 100mm 以上の長い距離を比較的容易に測定できるため、測定軸方向のデータ量が豊富である。

一方、近年では触針式表面粗さ測定機以外の様々な測定原理に則った非接触方式の測定機も広く普及している。“非接触”で計測する手段としては電子線（SEM など）や原子間力（AFM など）をプローブとして用いる測定機も存在するが、表面性状計測の分野で最も広く利用されているのが光学方式である。多くの光学式表面性状測定機は一度に測定できる領域は数 mm^2 程度であるが、測定対象物表面の面として広がりを持った領域を短時間に一括して測定できるため、情報量としては輪郭曲線方式にも劣らない。このような面としての広がりを持つ測定データに対する定量化手法（表面性状の検定方法）に関する ISO 規格の整備も進んできている。ISO では面としての広がりを持つデータを取り扱う方式を“Areal”と呼んでいる。現段階では JIS 化はされていないが、“Areal”が空間的な広がりを持つ凹凸情報であることの連想が容易となるように JIS 化の際は「三次元方式」と和訳される予定である。

情報量の豊富さを示す例として図 1.2 に三次元方式と輪郭曲線方式の測定データの例を示す。同図より(b)輪郭曲線方式では発見が困難なスクラッチ跡が(a)三次元方式では明瞭に識別できることが分かる。図 1.3 は様々な機械加工面の三次元方式の測定例を示す。ここでは機械加工の種類に応じた表面性状の特徴が視覚的にも明瞭であることが分かる。

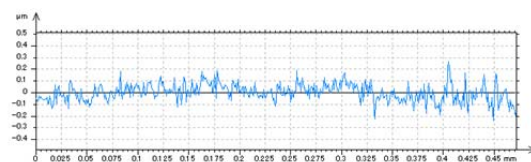
	Chain Link						
	A	B	C	D	E	F	G
	Symbols and indications (図面への指示方法)	Feature requirements (実形体への要求)	Feature properties (実形体の特性)	Conformance and non-conformance (適合と不適合)	Measurement (測定条件への要求)	Measurement equipment (測定機への要求)	Calibrations (校正に関する要求)
Size (サイズ)							
Distance (距離)							
Form (形状)							
Orientation (姿勢)							
Location(位置)							
Run-out (振れ)							
Profile surface texture (表面性状-輪郭曲線)							
Areal surface texture (表面性状-三次元)							
Surface imperfection (表面欠陥)							

図 1.1 ISO が提唱する GPS マトリックス[1]



スクラッチ

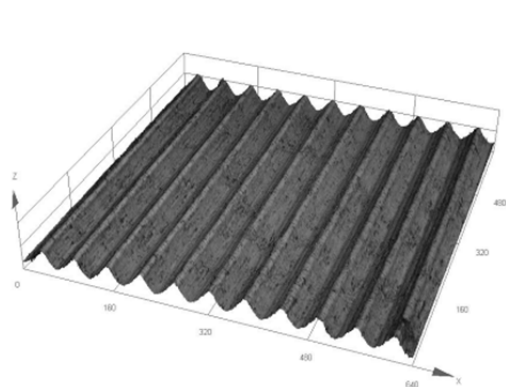
(a)三次元方式



スクラッチは識別できない

(b)輪郭曲線方式

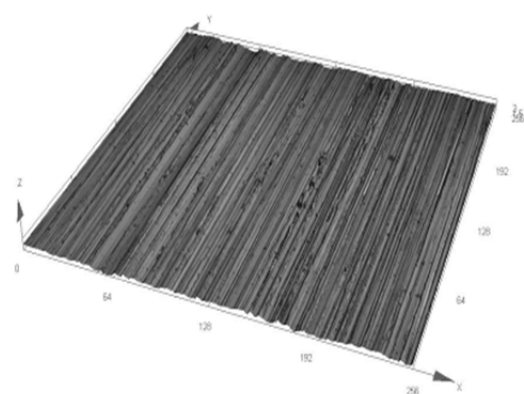
図 1.2 情報量の比較



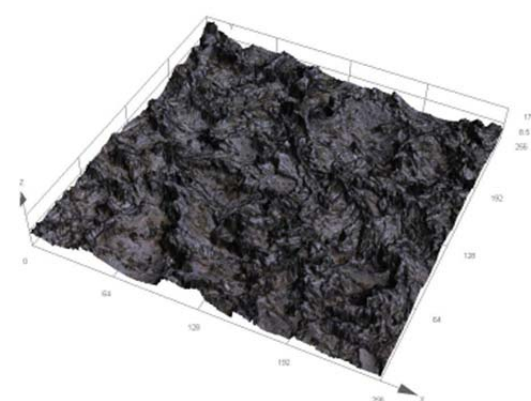
(a)旋削面 (640x640um)



(b)放電加工面 (256x256um)



(c)研削面 (256x256um)



(d)ワイヤ放電加工面 (256x256um)

図 1.3 様々な機械加工面の測定例

1.2 国際標準化の動向

現行の輪郭曲線方式の ISO/JIS 規格[2]-[13]は、触針式表面粗さ測定機の利用だけを前提としている。その一方で、既に多くの非接触測定機が表面性状測定機として事実上利用されており、工業標準も非接触測定機の利用に対応することが産業界から強く望まれるようになってきた。このような背景を受け、ISO の第 213 専門委員会 (TC213 : Dimensional and geometrical product specification and verification) の第 16 ワーキンググループ (WG16) では三次元表面性状の検証方法 (Areal and profile surface texture) の規格化を推進している。ここでは主に ISO25178 シリーズ (Geometrical product specification (GPS) –Surface texture : Areal –) として規格案を作成し、その内容を審議している。表 1.1 に ISO25178 シリーズのパート別のタイトルと進展状況 (2014 年 5 月現在) 及び記載内容の概要をまとめた。なお、触針式測定機を対象とした従来の輪郭曲線方式の一連の規格群も、将来的には面に対応した新しい規格群に整合するように全面的に見直しがなされる見込みである。

次項以降に、表 1.1 に示した規格群の要点についてまとめる。

表 1.1 ISO25178 シリーズの状況 (2014 年 5 月現在)

パート 番号	公布年 又は 進捗状 況	パートタイトル	概要
Part1	DIS	Indication of surface texture	図示方法
Part2	2012	Terms, definitions and surface texture parameters	三次元表面性状 パラメータ
Part3	2012	Specification operators	測定, 解析条件
Part6	2010	Classification of methods for measuring surface texture	測定機の分類
Part70	2014	Material measures	校正用標準片
Part71	2012	Software measurement standards	ファイルフォーマット
Part600	WD	Metrological characteristics for areal-topography measuring methods	計測特性の定義
Part601	2010	Nominal characteristics of contact (stylus) instruments	触針方式の公称特性
Part602	2010	Nominal characteristics of non-contact (confocal chromatic probe) instruments	色収差共焦点プローブの公称特性
Part603	2013	Nominal characteristics of non-contact (phase-shifting interferometric microscopy) instruments	位相シフト干渉法の公称特性
Part604	2013	Nominal characteristics of non-contact (coherence scanning interferometry) instruments	垂直走査低コヒーレンス干渉法の公称特性
Part605	2014	Nominal characteristics of non-contact (point autofocus probe) instruments	点合焦プローブの公称特性
Part606	DIS	Nominal characteristics of non-contact (Focus variation) instruments	全焦点画像顕微鏡法の公称特性
Part607	WD	Nominal characteristics of non-contact (Confocal microscopy) instruments	共焦点顕微鏡法の公称特性
Part701	2010	Calibration and measurement standards for contact (stylus) instruments	触針走査式測定機の校正方法

DIS : Draft International Standard, WD: Working Draft

1.2.1 表面性状の図示方法

ドラフト段階ではあるが，ISO/DIS25178-1[14]では設計図面上への三次元表面性状の図示方法の案が記されている．図示記号の例を図 1.4 に示す．

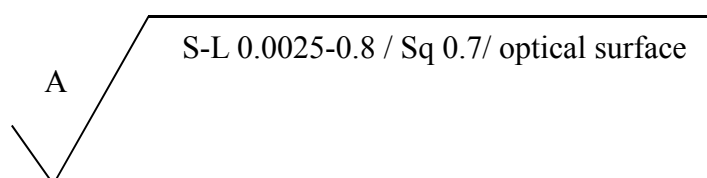


図 1.4 図示記号の例 (ISO/DIS25178-1) [14]

図 1.4 の図示内容を要約すると，三次元方式 (Areal) で評価することを指示する記号 “A”，解析する波長帯を表す “S-L” (第 1.2.3 項で後述)，三次元表面性状パラメータ “Sq” (第 1.2.2 項で後述)，光学的な手法を使うことの指定を意味する “optical surface” といった詳細な指定が可能である．ここで ISO25178-2:2012[15]では表 1.2 に示すように固体表面を機械的表面と電磁氣的表面の 2 種に大別している．図 1.4 の “optical surface” は後者に該当する．同じ固体表面に対して 2 種の輪郭面の名称を定義したことは，GPS[1]の基本的な考え方である「あいまい性の排除」に逆行しているとも捉えられる．しかし，別の角度から考えると，触針走査方式のような機械式と光のような電磁波方式とでは，観測している物理現象が違うため，両者を別物として互いに区別することの方がよりあいまい性を排除できるとの考え方も出来る．筆者の個人的な考えではあるが，この点に関しては議論の余地が残ると考えている．

表 1.2 測定方式による表面の区別(ISO25178-2) [15]

用語	定義
Mechanical surface	半径 r の接触球が標本表面を転がった場合の球の中心の軌跡
Electromagnetic surface	標本表面と電磁波との相互作用によって得られる表面

なお、ISO/DIS25178-1[14]で示された図 1.3 のような”optical surface”という表現は表 1.2 に掲げた先行規格 ISO25178-2[15]の用語の定義に併せて”electromagnetic surface”に変更すべきとの議論がなされている最中であり、今後変更される可能性があることを付け加えておく。

1.2.2 三次元表面性状パラメータ

表 1.3 は ISO25178-2:2012[15]で定義された三次元表面性状パラメータの一覧である。輪郭曲線方式では解析する波長帯に応じて P（断面）、R（粗さ）、W（うねり）のようにパラメータ記号をアルファベットで分けて記述したが[4]、三次元方式ではこのような区別をしていない。区別の仕方については第 1.2.3 項で述べる。三次元表面性状パラメータは次の(1)～(7)に分類される。個々のパラメータの詳細に関しては ISO 規格[15]を参照願うが、分類ごとの概要を下記にまとめる。

(1) Height parameters（高さパラメータ）

輪郭面の高さ値 $Z(x,y)$ を基に算出されるパラメータである。代表例として S_z （最大高さ）や S_a （算術平均高さ）などがあり、これらは二次元の輪郭曲線方式を三次元に拡張した考え方となっているため、産業界で最も広く使われるパラメータの 1 つである。

(2) Spatial parameters（空間パラメータ）

輪郭面の空間的な広がり方（等方性や異方性など）を特徴付けるパラメータである。その手段として自己相関関数を利用する S_{al} と S_{lr} がある。

(3) Hybrid parameters（複合パラメータ）

振幅と空間的な広がりとの関係を表したパラメータである。輪郭面の勾配や表面積を利用したパラメータ S_{dq} や S_{dr} がある。

(4) Functions and related parameters（機能と関連付ける為のパラメータ）

負荷曲線を用いるパラメータである。これは二次元の輪郭曲線方式のプラトー構造表面に関するパラメータを三次元に拡張したものである。また、三次元方式ならではの特徴として、空間的な容積を利用したパラメータ（ISO 規格[15]ではこれらを”V-parameter”と呼んでいる。）も新たに定義された。

(5) Fractal methods（フラクタル法を使った解析）

フラクタル法は複雑さを数値化（フラクタル次元と呼ばれる）するための考え方であり、

これを三次元表面性状の解析に応用し、パラメータ化したものである。従来の輪郭曲線方式には無く、三次元方式で新たに提案されたパラメータである。

(6) Miscellaneous parameter (その他のパラメータ)

現在ここに分類されたパラメータは S_{td} (テクスチャの方向) のみである。これは輪郭面のフーリエスペクトルを用い解析するパラメータである。

(7) Named feature parameters (形体パラメータ)

輪郭面の山や谷といった形状要素を利用したパラメータである。

表 1.3 三次元表面性状パラメータ(ISO25178-2)とデフォルト単位(ISO25178-3)

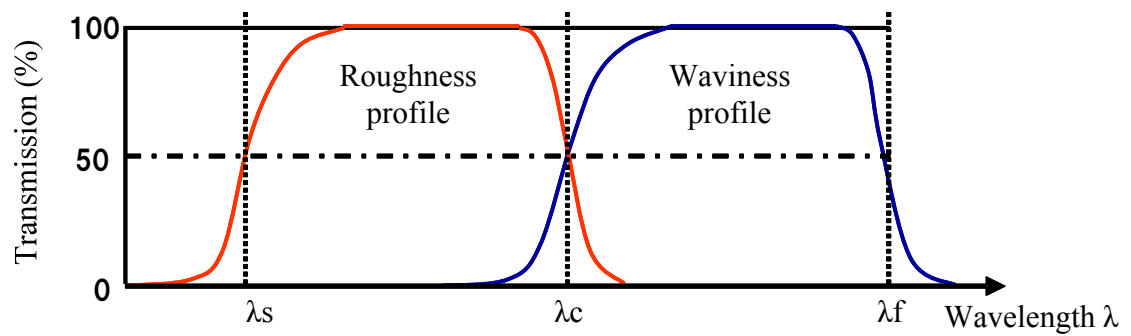
Height parameters			Default units		
Root mean square height	S_q		μm		
Skewness	S_{sk}		1		
Kurtosis	S_{ku}		1		
Maximum peak height	S_p		μm		
Maximum pit height	S_v		μm		
Maximum height	S_z		μm		
Arithmetical mean height	S_a		μm		
Spatial parameters					
Autocorrelation length	S_{al}		μm		
Texture aspect ratio	S_{tr}		1		
Hybrid parameters					
Root mean square gradient	S_{dq}		radians		
Developed interfacial area ratio	S_{dr}		%		
Functions and related parameters					
Areal material ratio	$S_{mr}(c)$		%		
Inverse areal material ratio	$S_{mr}(mr)$		μm		
Core height	S_k		μm		
Reduced peak height	S_{pk}		μm		
Reduced valley height	S_{vk}		μm		
Material ratio	S_{mr1}		%		
Material ratio	S_{mr2}		%		
Dale root mean square deviation	S_{vq}		μm		
Plateau root mean square deviation	S_{pq}		μm		
Material ratio	S_{mq}		μm		
Void volume	$V_v(p)$		ml m^{-2}		
Dale void volume	V_{vv}		ml m^{-2}		
Core void volume	V_{vc}		ml m^{-2}		
Material volume	$V_m(p)$		ml m^{-2}		
Peak material volume	V_{mp}		ml m^{-2}		
Core material volume	V_{mc}		ml m^{-2}		
Peak extreme height	S_{xp}		μm		
Fractal methods			Default units		
Volume fractal complexity	S_{vf}		1		
Areal fractal complexity	S_{af}		1		
Miscellaneous parameter					
Texture direction	S_{td}		degrees		
Named feature Parameters					
Density of peaks	S_{pd}		mm^{-2}		
Arithmetic mean peak curvature	S_{pc}		mm^{-2}		
Ten-point height of surface	S_{10z}		μm		
Five point peak height	S_{5p}		μm		
Five point pit height	S_{5v}		μm		
Mean dale area	$S_{da}(c)$		μm^2		
Mean hill area	$S_{ha}(c)$		μm^2		
Mean dale volume	$S_{dv}(c)$		μm^3		
Mean hill volume	$S_{hv}(c)$		μm^3		

1.2.3 表面性状評価のための前処理[15]

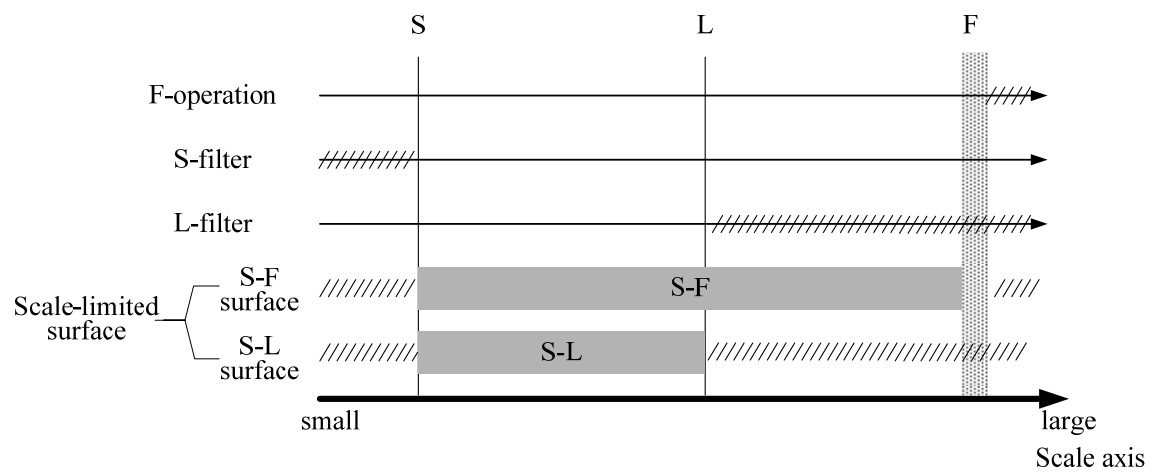
輪郭曲線方式では図 1.5(a)に示すように、カットオフ波長 λ_s , λ_c , λ_f で設定した輪郭曲線フィルタによって測定データから断面曲線, 粗さ曲線, うねり曲線を求めた[4]. 三次元方式では同図(b)に示すようにこれら3つのフィルタ処理をSフィルタ(S-filter), Lフィルタ(L-filter)および形状を除去するF演算(F-operation)の3つに置き換え, これらを輪郭面フィルタ(surface filter)と呼ぶことにした[15]. SフィルタとLフィルタの間の波長成分のデータをS-L輪郭面(S-L surface), SフィルタとF演算の間の波長成分をS-F輪郭面(S-F surface)と呼び, このような波長帯域に制限を受けた輪郭面のことをスケールの上下限を定めた輪郭面(Scale-limited surface)と呼ぶ.

Sフィルタ, Lフィルタ, F演算の特性値は輪郭曲線方式で用いた「カットオフ」ではなく, 「ネスティングインデックス(Nesting index)」という新しい用語を用いることになった. このような新しい用語が登場した理由は, 将来 ISO16610 シリーズとして公布が予定されている様々な種類のフィルタ処理に対応するためである. これらのフィルタでは必ずしも波長(長さ)の単位でフィルタ特性が指定されるわけではないので, “インデックス”という一見分かりにくい表現を使っている. 例えばウェーブレットフィルタのネスティングインデックスはウェーブレット変換の次数で与えられる.

なお, 従来から広く用いられているガウシアンフィルタ[7]を利用する場合のネスティングインデックスはカットオフ波長と等価である.



(a) 輪郭曲線方式



(b) 三次元方式

図 1.5 帯域制限と評価対象

1.2.4 測定条件, 解析条件[16]

表 1.4 は光学式測定機を用いる場合の測定要件を与える表である. この表から分かることは, 測定したい S フィルタのネスティングインデックスが決まると, サンプルング間隔と空間波長検出限界(Lateral period limit)といった測定機の仕様に求められる要件が決定するという点である. 具体的には空間波長検出限界は S フィルタのネスティングインデックスよりも小さな条件を, サンプルング距離はネスティングインデックスの 1/3 以下となる条件で測定することが求められている. 空間波長検出限界の ISO 規格での定義は「正弦波状の輪郭に対して、光学的な振幅の応答が 50%まで低下する空間周期」で与えられる[16]. これはレイリーやスパロー限界といった光学理論から導かれる同一平面内の 2 点識別能力とは別物であり, 測定機の収差や調整状態などにも影響される微細領域での計測能力を示す特性値である. ISO 規格では空間波長検出限界の定義は存在するが, その検定方法については具体的な記述がなく, 未だ研究途上である. そのため, 表 1.4 で要求される測定条件を正しく選択することは現段階では困難と思われる. この課題に関しては第 1.6 節で再び述べる.

表 1.4 S フィルタネスティングインデックスとサンプルング間隔, 空間波長検出限界の関係

S-filter nesting index value mm	Maximum sampling distance mm	Maximum lateral period limit mm
...
0,000 1	0,000 03	0,000 1
0,000 2	0,000 06	0,000 2
0,000 25	0,000 08	0,000 25
0,000 5	0,000 15	0,000 5
0,000 8	0,000 25	0,000 8
0,001	0,000 3	0,001
0,002	0,000 6	0,002
0,002 5	0,000 8	0,002 5
0,005	0,001 5	0,005
0,008	0,002 5	0,008
0,01	0,003	0,01
0,02	0,006	0,02
0,025	0,008	0,025
0,05	0,015	0,05
0,08	0,025	0,08
0,1	0,03	0,1
0,2	0,06	0,2
0,25	0,08	0,25
...

表 1.5 は ISO25178-3:2012 に示された S フィルタ, L フィルタ, F 演算のネスティングインデックスの組み合わせを示す表である。これらの ネスティングインデックスの値はそれぞれ自由に設定してよいわけではなく, S と L または S と F の比率, つまり解析バンド幅が所定の値 (100:1, 200:1 など) となるような表中の組み合わせの中から選択する事が基本となる。このとき注意すべきは評価領域 (Evaluation area) が F 演算又は L フィルタのネスティングインデックスと同じ長さ以上の正方形領域が必要となる点である。つまり前述した表 1.4 では測定機の微細領域での計測能力 (空間波長検出限界) が, 表 1.5 では測定視野の大きさに対する要求が決定する。測定視野の大きさと微細領域の計測能力がトレードオフの関係となる場合の多い光学式測定機にとって解析バンド幅をどこまで広く設定できる能力があるかという事が測定機の選定のポイントの 1 つとなるであろう。

表 1.5 解析のバンド幅

Nesting index value (F-operation/ L-filter) mm	S-filter nesting index value mm	Approximate bandwidth ratio between (F-operation/L-filter) and S-filter nesting index values
...
0.1	0,001	100:1
	0,000 5	200:1
	0,000 2	500:1
	0,000 1	1 000:1
0.2	0,002	100:1
	0,001	200:1
	0,000 5	400:1
	0,000 2	1 000:1
0.25	0,002 5	100:1
	0,000 8	300:1
	0,000 25	1 000:1
0.5	0,005	100:1
	0,002	250:1
	0,001	500:1
	0,000 5	1 000:1
0.8	0,008	100:1
	0,002 5	300:1
	0,000 8	1 000:1
...

1.3 測定法及び測定機の分類 [17]

ISO25178-6:2010[17]では様々な表面性状測定機を図 1.6 のように測定データが① $Z(x)$ で表される輪郭曲線方式，② $Z(x,y)$ で表される三次元方式，そして測定結果を凹凸形状データではなく③面内を積分する方法，という 3 つに分類した．本規格の公布前の審議中のドラフト段階では測定原理に基づいた分類もなされたが，様々な技術的側面からの分類が可能であったため，議論がまとまらず最終的に図 1.6 のような半ば羅列に近い分類に留まったという経緯もある．

現在，三次元表面性状機として産業界で広く普及している測定機は②が主力であり，しかも多くが光を用いたものである．筆者の独断と偏見があるかも知れないが，表面性状測定機として産業界で広く普及していると思われる測定機には図 1.6 中にアンダーラインを付けた．また，括弧内の数値は ISO25178 シリーズのパート番号を表しており，表 1.1 に示したパート番号と対応している．

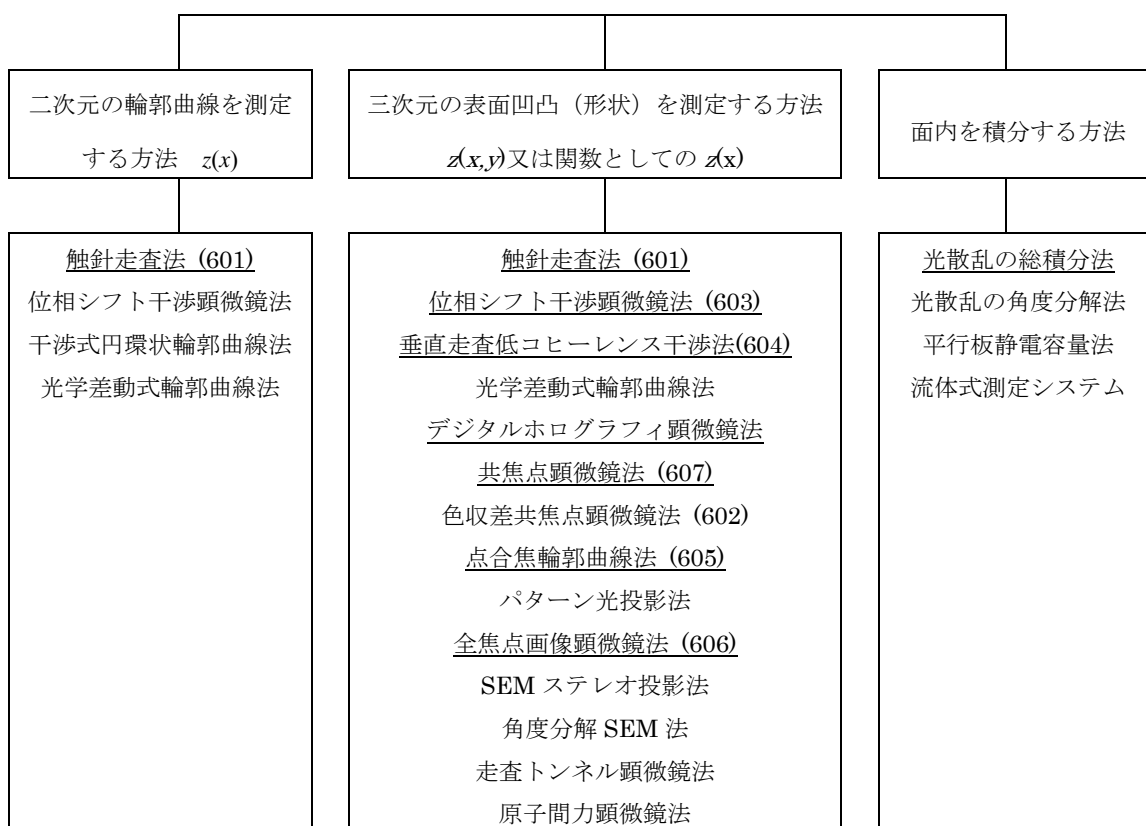


図 1.6 ISO25178-6:2010 における測定機の分類

1.4 座標系に注目した場合の測定機の種類

どのような測定機でも、その内部には必ず X,Y,Z 軸の座標系の基準を備えている。例えば CCD などのエリア撮像センサを利用した測定機の場合（ex. 垂直走査低コヒーレンス干渉法，全焦点画像顕微鏡法など），撮像センサの画素配列が X,Y 座標軸の基準となる．光と測定対象物を相対スキャンさせる測定機（ex. 共焦点顕微鏡法のレーザスキャンタイプ，点合焦輪郭曲線法）ではスキャン系が座標の基準となる．座標系の基準に応じて，その方式独自の誤差要因が存在し，これを理解した上で正しく校正，検定することが重要である．そこで表 1.6 に示すように座標系の構成要素に注目して，市販されている主要な測定機に関して分類した．

表 1.6 座標系による測定機の種類

		X, Y 座標軸の基準要素	
		X, Y スキャン座標	エリア撮像センサ座標
Z 座標軸の基準要素	Z スキャン座標	<ul style="list-style-type: none"> ■ 共焦点顕微鏡法（レーザスキャンタイプ） ■ 点合焦輪郭曲線法 ■ 触針走査法 ■ 原子間力顕微鏡法 	<ul style="list-style-type: none"> ■ 共焦点顕微鏡法（ディスクスキャンタイプ） ■ 全焦点画像顕微鏡法 ■ 垂直走査低コヒーレンス干渉法
	光源波長を基準とした座標		<ul style="list-style-type: none"> ■ 位相シフト干渉顕微鏡法 ■ デジタルホログラフィ顕微鏡法
	焦点位置の色分散を基準とした座標	<ul style="list-style-type: none"> ■ 共焦点顕微鏡法（色収差プロープ） 	

以下に座標系の構成要件別に、それぞれの誤差要因と校正の際の注意点について考察する。

図 1.7(a)に示すようなエリア撮像センサを利用する測定機の X,Y 座標の誤差要因は光学系の倍率誤差，結像光学系の像面の歪曲，軸外の収差などが考えられるため，測定視野中心と周辺部の性能差に留意して校正すべきである。

図 1.7(b),(c)のような X,Y スキャンを利用する測定機の X,Y 座標の誤差要因は，スキャン系の運動誤差がそのまま誤差となる。特にリニアリティ，スキャン動作のジッタ等を留意した校正が必要である。

Z スキャン座標を用いる測定機の多くは装置内部に長さ測定の基準となる変位計（ガラススケールや静電容量変位センサ，レーザ干渉式変位センサ，差動トランスなど）を搭載していることが多い。Z 軸座標系の校正はこれらの変位センサのノンリニア成分の誤差（例えば内挿に由来する周期誤差など）に留意すべきである。また Z スキャン機構の運動誤差から生じるアッペの誤差も考えられるため，利用する可能性のある全測定ストローク位置で校正すべきである。

Z スキャン座標を用いない測定機は光の波長を長さの基準とする方式（位相シフト干渉法やデジタルホログラフィ顕微鏡法），光の波長による焦点位置の分散を長さ基準とする方式（色収差共焦点法）などが挙げられる。これらは光の波長や色分散という物理現象を長さのスケールに換算して測定を行うため，それらの変動要因（温度，光源の分光特性など）に配慮した校正が必要である。

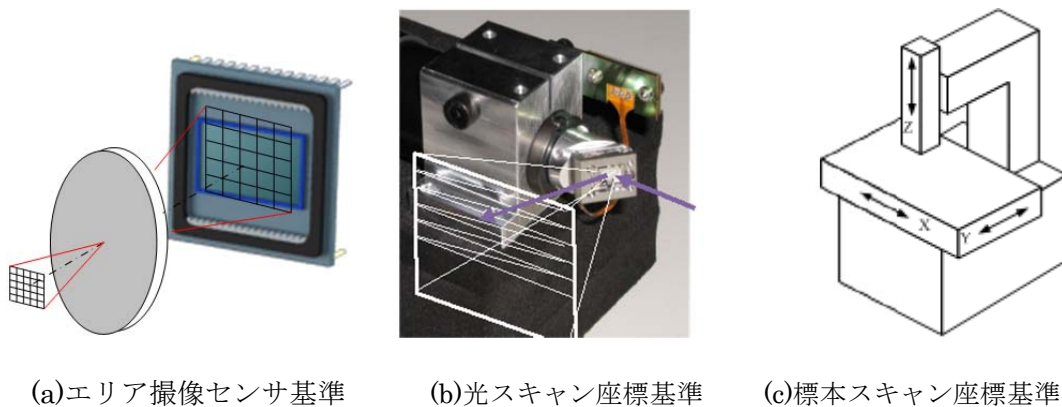


図 1.7 XY 座標軸の構成要件による分類

1.5 座標系の校正とそれに用いる標準片 [18][19]

表 1.7 は座標系の特性評価項目と、それに用いる測定標準面（標準片）についてまとめたものである。ISO25178-70:2014[18]には表 1.7 で示した以外の標準片も多く示されている一方で、それらの標準片を用いた具体的な校正手順や計測特性の評価項目については未だ規格ドラフトも出来上がっていない状況¹である。従って、現段階では幾つかの研究論文を通じた研究中的内容ではあるが、評価内容の概要について次項で紹介する。

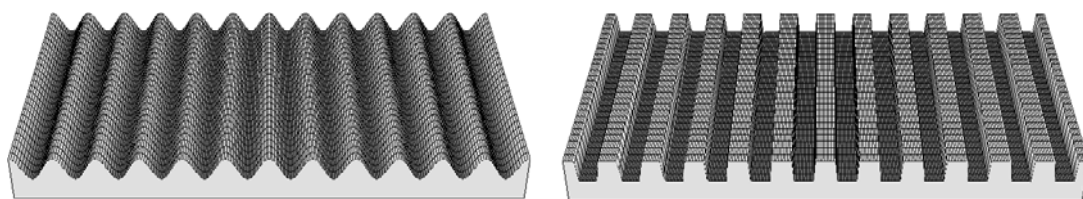
表 1.7 座標系の校正に関する特性評価項目と標準片

評価項目		標準片
X, Y 軸座標系	増幅率 (amplitude)	グレーティング【図 1.8】
	線形性(linearity)	
Z 軸	増幅率	深さ溝【図 1.10】
	線形性	
直角度	X-Y	クロスグレーティング【図 1.12】
	X-Z, Y-Z	—
平面度	平面度補正残差	オプティカルフラット

1.5.1 X,Y 軸座標系

図 1.8 に示すようなグレーティング構造の標準片を利用し、そのピッチ計測により図 1.9 に示すような座標軸の増幅率、線形性を校正する。光学顕微鏡の拡大像を利用する測定機の場合、光学像の拡大倍率が増幅率、像の歪みが線形性と考えることが出来る。なお、標準片に関して定めた ISO25178-70:2014[18]では言及していないが、顕微鏡の倍率校正に古くから利用される対物マイクロメータやガラススケールなどの線度器は比較的容易にトレーサブルなものを入手できるため、これを利用することも実用上は有効な方法と思われる。

¹ 規格番号 ISO25178-700 が割り当てられる予定である。



(a)正弦波形

(b)矩形波形

図 1.8 グレーティング標準片

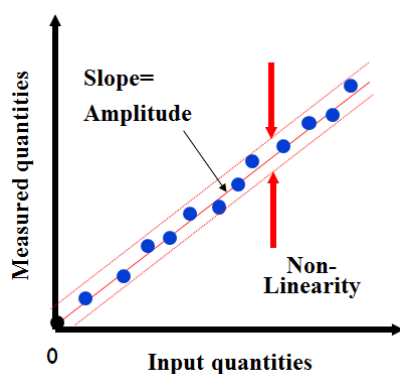


図 1.9 増幅率と線形性の評価

1.5.2 Z 軸座標系

図 1.10 に示すような深さ溝標準片を用い，増幅率と線形性を校正する．多くの光学式測定機では機械的な Z スキャン動作により Z 方向の計測を行うため，スキャンストローク範囲内の全域で，複数の深さの標準片を使用して校正することが望ましい．図 1.11 は 4 種類の段差標準片を使って測定機の器差²を評価した一例である[20]．

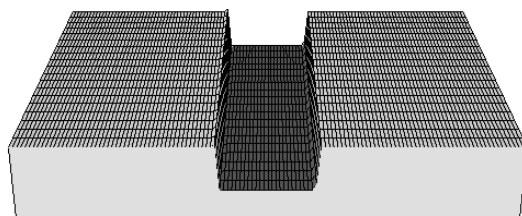


図 1.10 深さ溝標準片

² JIS Z8103(2000) 計測用語 によれば「器差」とは「測定器が示す値から示すべき真の値を引いた値」又は「標準器の公称値から真の値を引いた値」を意味である．

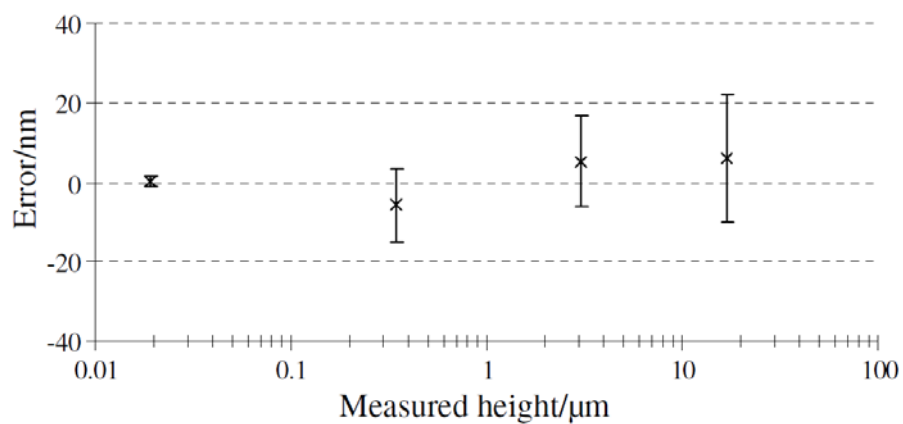


図 1.11 Giusca ら[20]による Z 軸の校正例

1.5.3 直角度

図 1.12 に示すようなクロスグレーティング構造の標準片を用いて X-Y 直角度を校正する。直角度は図 1.13 に示すように光学系の歪曲収差が影響するため、この点に留意して校正を行う。この標準片は X,Y 軸方向にそれぞれ等間隔な周期をもつため、X,Y 軸のそれぞれの座標系の校正に用いることも可能と思われる。

一般に、表面性状測定では Z 方向の測定寸法は X,Y 方向に比べ小さいため Z 軸と XY 平面の直交度(X-Z,Y-Z)は無視できる場合が多く、これを校正するための標準片は現段階では提案されていない。

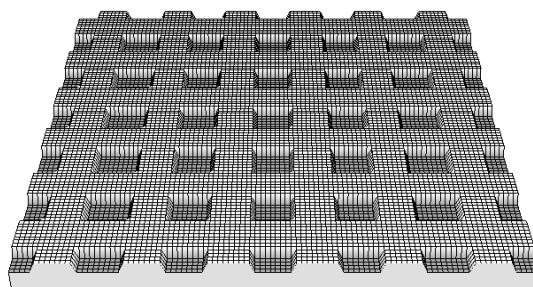


図 1.12 クロスグレーティング標準片

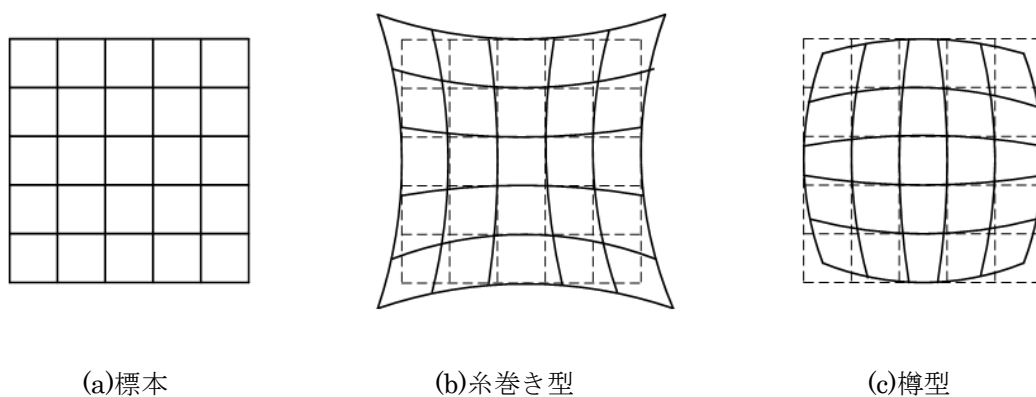


図 1.13 光学系の歪曲収差の典型例

1.5.4 平面度

光学顕微鏡の拡大像を利用する測定機では、光学系の像面湾曲によって平らな標本がZ方向に歪んで計測される場合がある。標本を X,Y 軸方向にスキャンする測定機ではスキャン動作の真直度(straightness)によって平面が歪んで測定される場合がある。このような歪みは図 1.14 に示すようにあらかじめ測定機内部に登録された歪みデータを減算することによって補正された結果として出力されることが多い。補正しきれずに残ったZ方向の歪み量を”平面度補正残差(residual flatness)”と呼ぶこともある。この評価にはオプティカルフラットが用いられる。

平面度補正残差の評価方法については Giusca らの提案する方法[21]に関して ISO/TC213/WG16 にて議論がなされている最中である。

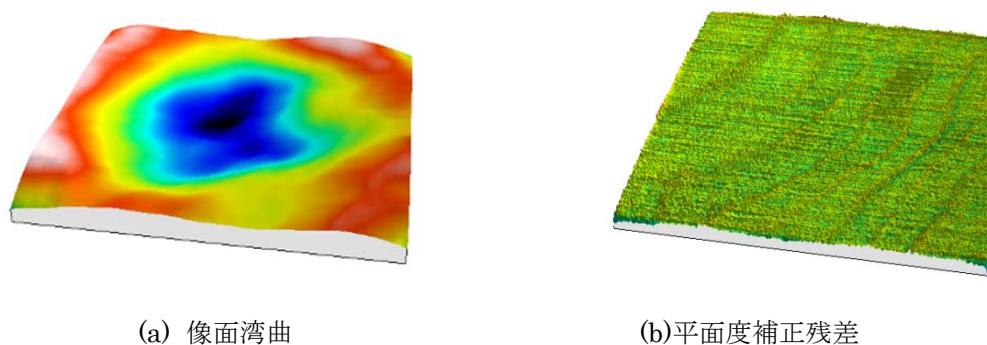


図 1.14 光学系の像面湾曲の典型例と平面度補正残差

1.6 表面凹凸に対するセンシング特性の評価方法と研究動向^[19]

光学式測定機では光のプロープを用いて非接触で標本の表面をセンシングする。光プロープと標本表面との相互作用は測定原理，条件ごとに独自の特性となるため，これを正しく評価し，測定の限界を明らかにすることは光学式測定機の測定データの信頼性と互換性を向上させるためには極めて重要である。表 1.8 に主なセンシング特性とその評価に用いる標準片についてまとめ次項で解説する。

表 1.8 センシング特性の評価綱目

評価項目	標準片
測定ノイズ (Measurement noise)	オプティカルフラット
空間波長検出限界 (Lateral period limit)	正弦波形【図 1.8(a)】 放射状溝【図 1.16】
最大局所傾斜角 (Maximum local slope)	未定
総合点検 (Overall check on calibration)	不規則凹凸表面【図 1.21】

1.6.1 測定ノイズ

測定データに含まれる Z 方向ノイズ成分を意味する。この評価には第 1.5.4 項で述べた平面度の評価と同様，オプティカルフラットを用いる。オプティカルフラットの測定データの低周波成分を平面度，高周波成分を測定ノイズとみなす。ISO/TC213/WG16 では測定ノイズを表 1.9 に示すような”Static noise”や”Dynamic noise”といったようにノイズ発生源別に区別した用語を定義することも検討されている。なお，Z 分解能の評価方法に関する議論は今の所無いが，この測定ノイズの評価が Z 分解能を示す 1 つの指標となると思われる。

表 1.9 測定ノイズへの影響要因

環境ノイズ	床振動，騒音，風，温湿度，気圧，，，	Static Noise	Dynamic Noise
装置内部のノイズ	電気ノイズ，光学（迷光）ノイズ，，，		
	スキャン動作などに伴う装置内部の振動		

1.6.2 空間波長検出限界

図 1.15 で示すように ISO 規格[16]では測定される振幅が 50%に低下するときの正弦波の周期を空間波長検出限界(Lateral period limit)として定義している．つまり，この特性は X-Y-Z 空間内での形状識別能力を示しており，X-Y 平面内での近接した 2 点の識別能力を示すレイリー分解能やスパロー分解能とはその意味合いが異なる．

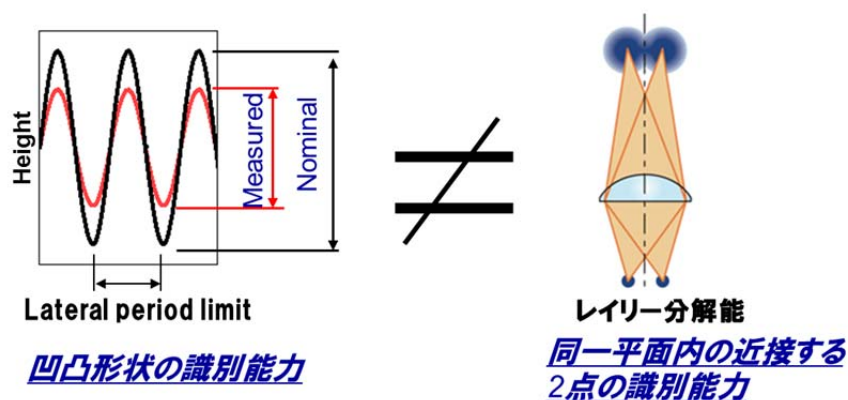


図 1.15 空間波長検出限界と光学分解能

第 1.2.4 節でも述べたが，空間波長検出限界は S フィルタの限界値を決定する重要な特性である．この評価を行うには様々な波長の正弦波断面標本が必要であるが，これに替わって図 1.16 に示すような放射状の矩形溝標準片も提案[18]されている．これは円周方向の断面プロファイルのピッチが半径に応じて連続的に変化するため，1つの標準片で様々な波長に対する応答を一度に評価でき簡便である[22]-[24]．但し，正弦波断面で定義された空間波長検出限界を矩形断面で代用するため，矩形のエッジ部でしばしば発生する異常値(測定原理に則らない外れ値)への対処については検討の余地が残る．

図 1.17 に共焦点顕微鏡法（走査型レーザ顕微鏡）による放射状矩形溝標準片の測定結果と，図 1.18 にこの結果を基に求めた振幅の応答特性の評価結果[24]の一例を示す．

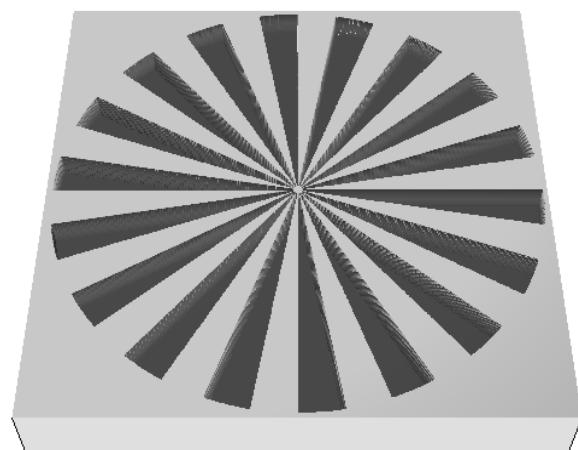


図 1.16 放射状溝標準片

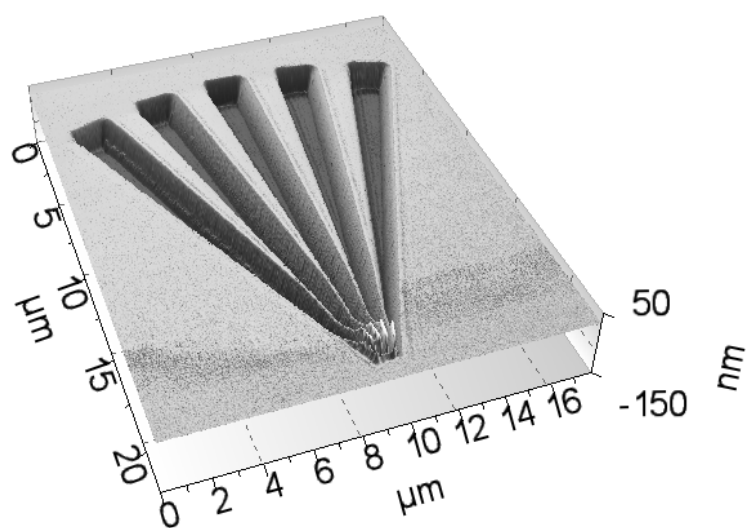


図 1.17 走査型レーザ顕微鏡による放射状溝標準片の測定結果[24]

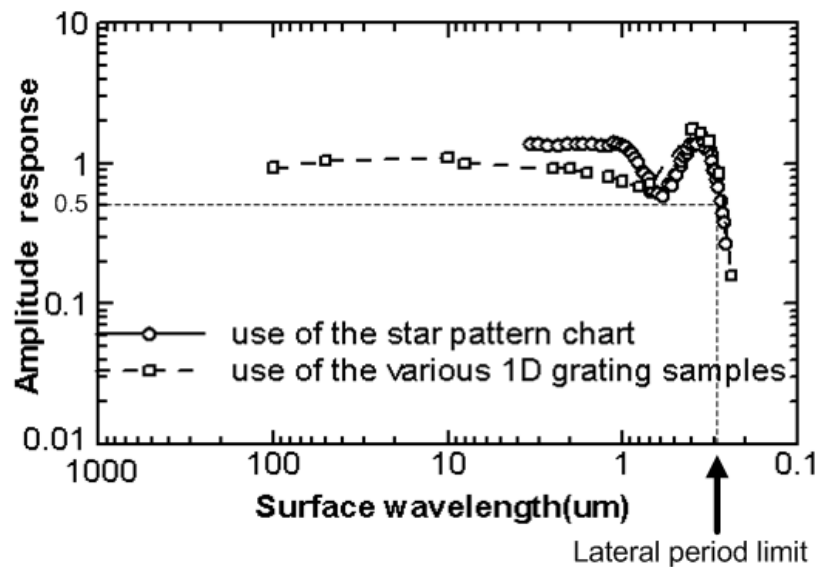


図 1.18 振幅の応答特性の評価例[24]

1.6.3 最大局所傾斜角

最大局所傾斜角(Maximum local slope)は「プロービングシステムによって評価可能な表面の最大の局所傾斜角」として定義されているが[25][26]，その具体的な評価方法については明確にはなっていない．光学式測定機では測定対象物からの反射光，散乱光を利用するため，表面の傾斜角度と検出の可否は測定機，測定条件ごとに大きく異なる．光学式測定機の利用者にとってこの特性に関する関心は強く，測定機選定のための重要な性能であるため，具体的な評価方法の規格化が望まれる．

筆者らは最大局所傾斜角の評価一例として図 1.19 に示すような半球標準片を利用した評価した．この標準片は元々X,Y,Z 軸座標系の総合点検に使うことを想定して提案されたものであるが，ここでは図 1.20 に示すような傾斜角度と検出誤差の関係を評価した[27]．Ehrigら[28]はいくつかの測定原理の異なる光学式表面性状測定機を対象として，半球表面の *rms* 粗さと測定機が許容できる最大の傾斜角度の関係を評価している．

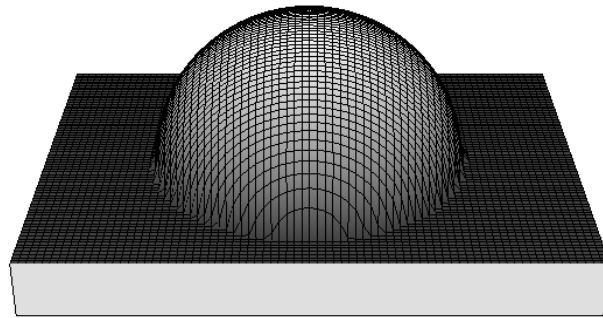


図 1.19 半球状標準片

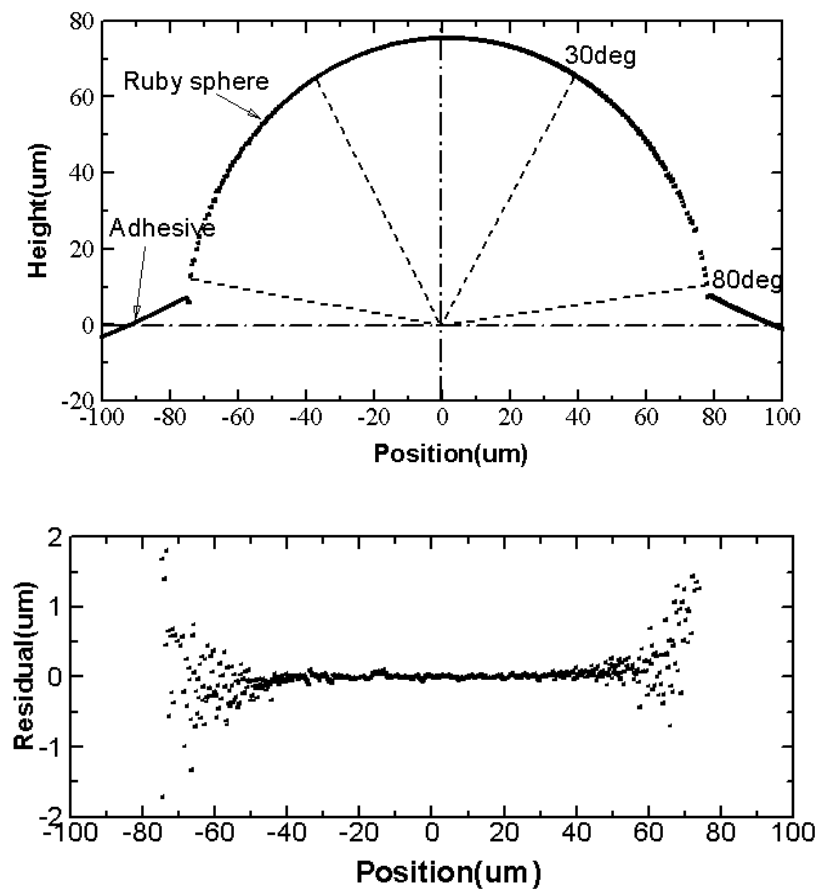


図 1.20 急傾斜角の測定と呼び形状に対する形状残差の評価例[27]

1.6.4 総合点検

測定機本体だけではなく、表面性状パラメータを導出するソフトウェアも含めた総合的な特性の検証用途として、**図 1.21** に示す不規則凹凸表面を持つ標準片が提案されている[18].

この標準片の凹凸形状は様々な波長成分が含まれるように設計された表面[29]-[31]であって、光学式測定機の定期的なコンディション管理のためとしても利用することを想定している。さらに、異種測定機間の測定データを比較するなど、測定機の信頼性を評価する上でも有用であり、実用面で利用価値の高い標準片である。

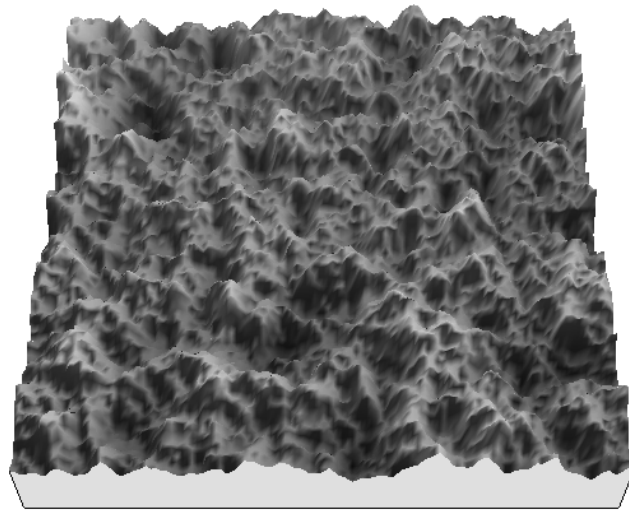


図 1.21 不規則凹凸表面を持つ標準片

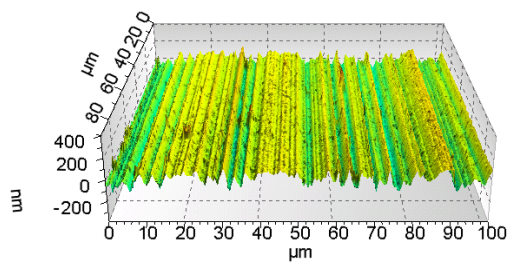
1.7 光学式測定機の抱える課題

1.7.1 異機種間の測定データの差異

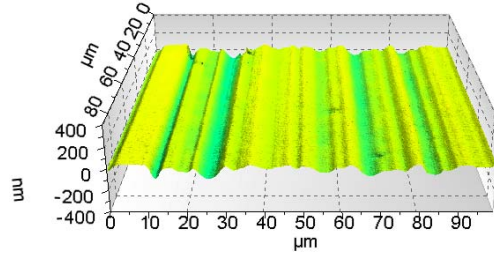
図 1.22 は測定原理や条件の異なる 4 つの市販測定機で同一標本を測定した結果である。鳥瞰図は全て同一のスケールで表示している。図からも明らかなように同一の標本であっても異機種、異条件においては得られる測定結果は大きく異なる場合がある。しかも数%～数十%といったオーダーではなく、(b)と(e)のような S_a で 4 倍近い差となる場合もある。

個々の輪郭面を見ると、(c)や(d)のようにスパイク状のデータが重畳しているように見える場合や、一見すると正しく測定できているように見える(e)や、明らかに X,Y 方向の分解能が不足している(b)のようなケースがある。これらは他の複数のデータと比較して初めて気付く事柄であって、1 つの測定機でしか測定しない通常の作業者はこれに気付くのは困難である。光学式測定機に限った話ではないが、正しい測定を行うためには作業者に対して測定機や測定条件を選定するための計測特性に関する正しい情報を提供することが必要である。そのためにも測定機の計測特性、特に限界性能を正しく評価するための規範作りが必要である、

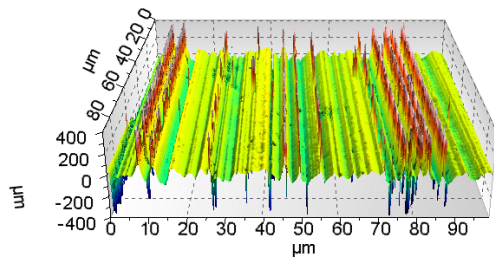
図 1.22 にて使用した測定機は当然ながら第 1.5 節で述べたような座標系の校正は行っている。つまり、座標系の校正を正しく行ってもこのような測定結果の差異を解決することはできないと言える。第 1.6 節で述べたような光学センサ固有のセンシング特性を正しく評価し、測定機の計測限界を明らかにする方法に関する研究を前進させ、光学式測定機の測定データの信頼性を向上させる必要がある。これが本研究に着手した最大の動機である。



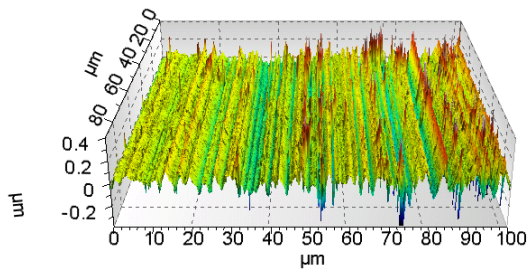
(a)Sa=0.043um



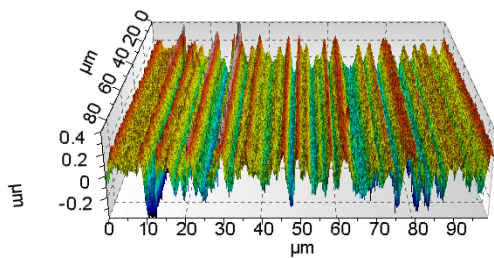
(b)Sa=0.028um



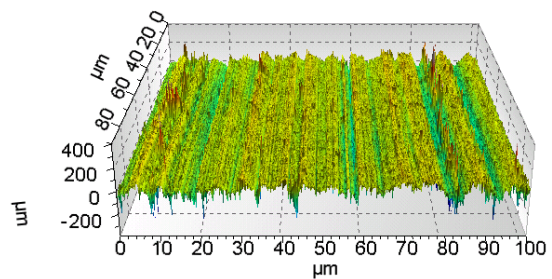
(c)Sa=0.045um



(d)Sa=0.056um



(e)Sa=0.111um



(f)Sa=0.042um

図 1.22 市販測定機 6 機種による同一標本の測定結果

1.7.2 異常値問題

図 1.22 に示したような測定結果の差異の要因の 1 つに異常値がある。異常値は外れ値とも呼ばれ、測定の基本原理に則らない望まれないデータである。光学式測定機においては古くからその存在が問題視されており[32]-[34]、測定機の計測限界を議論する上では避けては通れない問題である。

異常値問題に関しては本論文の第 2 章～第 5 章で詳細の議論と考察を行う。ここでは異常値問題を取り扱ったいくつかの研究事例を紹介する。

Harasaki ら[35]は図 1.23 に示すような矩形エッジ部で発生するスパイク状の異常値がコウモリの翼の形に似た特徴的な輪郭形状であることから“Batwing (コウモリの翼)”と命名した。そして Batwing の発生する場所では垂直走査低コヒーレンス干渉法(CSI) の検出信号であるインターフェログラムの振幅が低下することを指摘し、この現象は光源のコヒーレンス長以下の段差の場合に顕著であることを実験的に確認した。

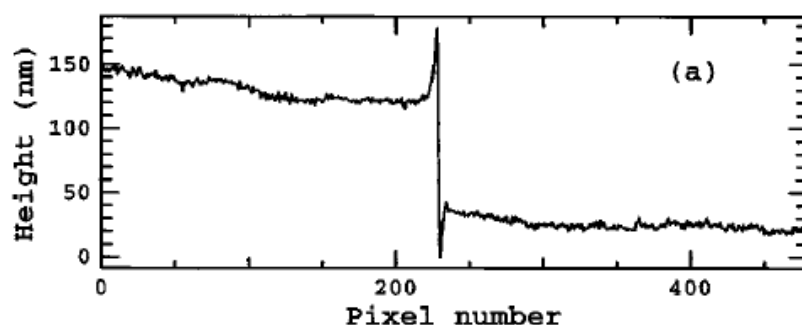
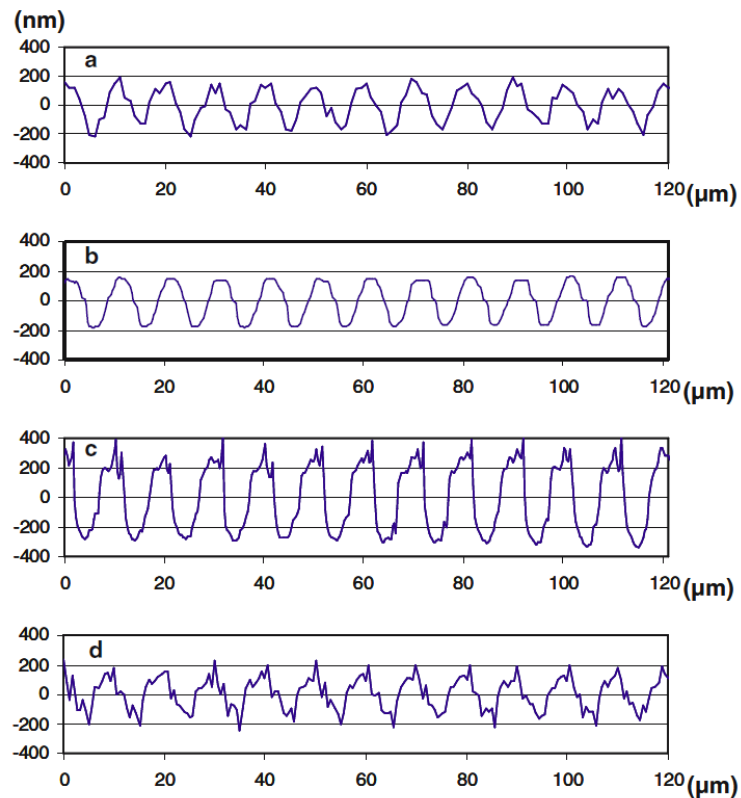


図 1.23 Harasaki らによる“Batwing(コウモリの翼)”現象の報告[35]

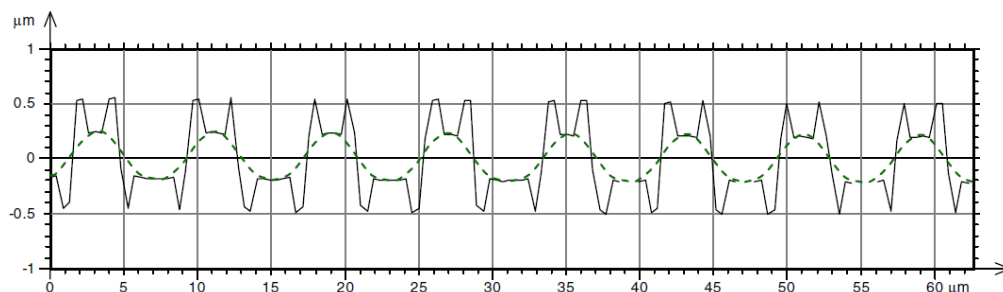
Vorburger ら[36]は図 1.24 に示すような触針走査法 (Stylus)、位相シフト干渉法 (PSI)、垂直走査低コヒーレンス干渉法(CSI)、共焦点顕微鏡法 (CM) の測定結果に差異が存在することを指摘した。そしてこの現象は測定標本表面での散乱状態の違いによって引き起こされ、スカラー光学理論を用いた弱散乱モデルでは十分に説明できない現象であることに言及し、ベクトル解析の必要性を述べた[37]。



(a)Stylus (b)PSI (c)CSI (d)CM 横軸は X 方向，縦軸は Z 方向を示す。

図 1.24 Vorburger らによる異種測定機間の測定結果の差異の指摘[36]

Gao ら[38]は図 1.25 に示すように CSI を用いた場合の正弦波断面の傾斜面において異常値が多く発生し，低 NA ほど顕著であることを指摘した．しかも異常値は対物レンズの NA によって決定される幾何光学理論上の最大許容傾斜角よりも小さな傾斜で発生することを指摘した．



横軸は X 方向，縦軸は Z 方向，点線は標本の公称形状，実線は実測結果を示す

図 1.25 Gao らによる CSI を用いた場合の正弦波斜面で発生する異常値の指摘[38]

Lehamann[39][40]は表面の傾斜や曲面，光学系の軸外の色収差によって CSI のインターフェログラムの強度エンベロープがシフトし，これが原因で異常値が発生することを指摘した．そして図 1.26 に示すように CSI における高さの検出を強度エンベロープではなくて，干渉画像の位相情報を使うと異常値が少なくなると述べている．

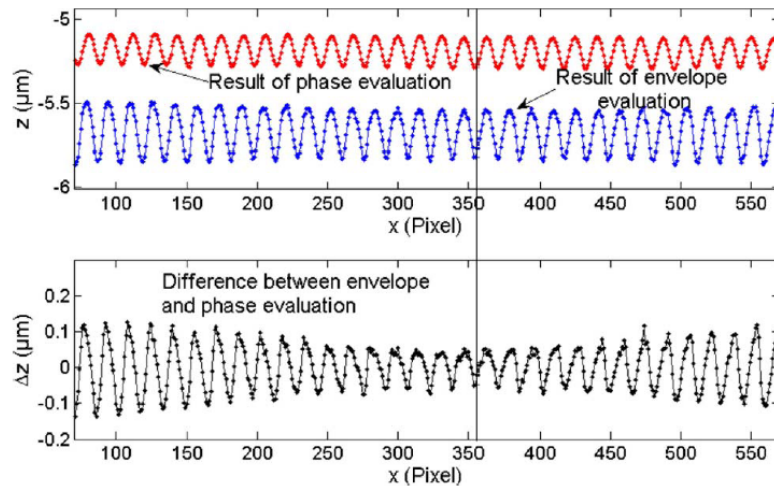
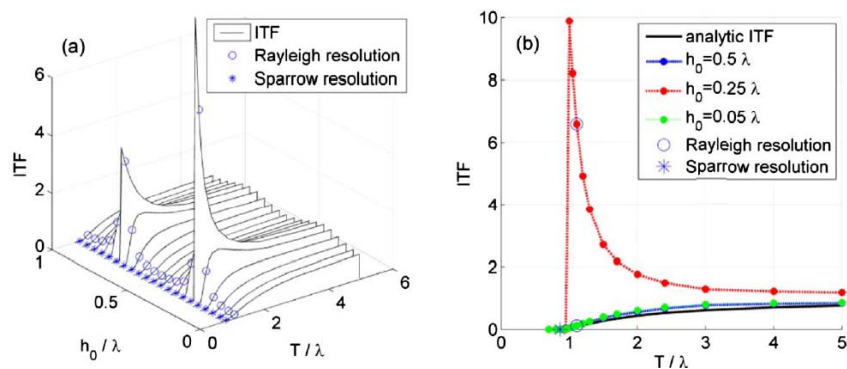


図 1.26 Lehamann らによる CSI の強度エンベロープシフトによる軸外の異常値[39]

Xie ら[41]は図 1.27 に示すように CSI の矩形グレーティングのアスペクト比とエッジ部での異常値の出現との関連についてスカラー光学理論を使って考察している．その中で異常値の発生は矩形の段差量と関連があることを指摘すると共に，厳密な解析のためには CSI 光学系の色収差や標本面での多重反射などを考慮したシミュレーションが必要であることも述べている．



h_0 : 標本振幅 (段差) , λ : 光源波長, T : グレーティング周期, ITF : 振幅の応答

図 1.27 Xie らによるグレーティングのアスペクト比と振幅の応答のスカラー解析例[41]

Leach ら[42]は測定機の振幅の伝達特性の重要性に関して述べると共に、強散乱標本を測定対象とする場合の伝達特性の評価は更なる研究が必要であることを述べた。

1.7.3 異常値への対処

異常値への対処方法は3つのアプローチが考えられる。①得られる源信号（強度信号など）を使って測定機側にて不確かな測定点を自動識別し、測定不能点としてデータの出力を行わないという方法。②測定によって得られた輪郭面データに対してソフトウェアを用いて異常値を識別しこれを解析の対象から除外する方法。③異常値の発生そのものを少なくする工夫を測定機側に施す方法、がある。①の方法は測定機メーカーがノウハウとして独自に実施する場合はほとんどであり、多くの情報は公開されていない。②と③に関して幾つかの研究事例を紹介する。

深津ら[43]は共焦点顕微鏡方式におけるレーザ光の集光スポット形状を円形から楕円形状へと大きくすることで、結像面でのスペックルを低減し異常値の発生を抑えた輪郭形状測定機を開発した。（③の研究事例）

齋藤[44][45]らは図 1.28 に示すように輪郭面の着目点 (i,j) とその近傍画素の Median 値 $S(i,j)$ を求め、全画素に対する $S(i,j)$ の累積確率曲線の変化率から輪郭面の異常値（外れ値）を求める手法を開発した。（②の研究事例）

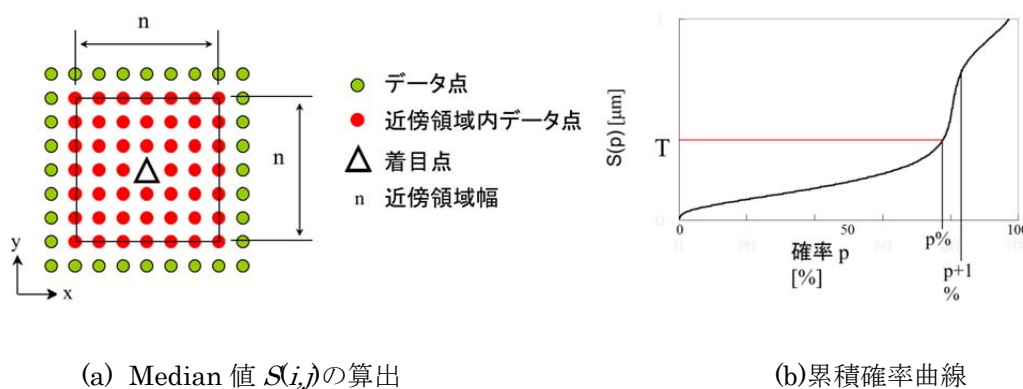


図 1.28 齋藤らによるソフトウェアを用いた異常値の検出方法の研究例[44]

Le Goic[46]らは図 1.29 に示すような Modal form-filtering という手法を使って測定により得られた輪郭面の形状成分とうねり成分を除去し，残った短波長成分の標準偏差を基にして異常値を検出する手法を開発した．（②の研究事例）

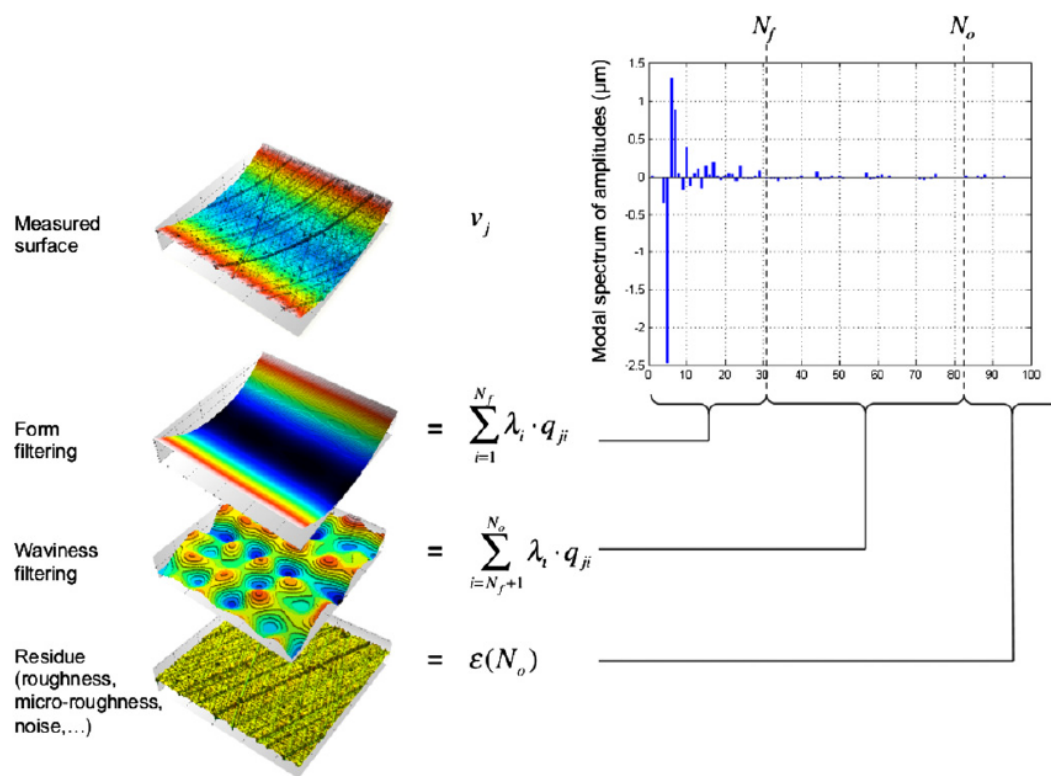


図 1.29 Le Goic らによる Modal form-filtering を用いた異常値の検出報告[46]

1.8 本研究の目的

第 1.2～1.5 節で述べてきたように，三次元表面性状パラメータ，解析条件，校正，測定機の分類といった標準化は確実に進んできている．その一方で，測定データの信頼性に関して，座標系の校正だけでは解決できない測定データの差異という問題を抱えていることを第 1.7 節で課題提起した．この課題の解決のためには第 1.6 節で述べたように「プローブと標本表面との相互作用」に関する研究を前進させる必要がある．図 1.30 に示すように”Mechanical surface”に対して触針プローブと標本表面の相互作用についても長年研究がなされてきたように（例えば[47]-[49]），“Electromagnetic surface”に対しても光（電磁波）プローブと標本表面の間で発生している現象を明らかにしてゆくことが，光学式測定機の信頼性向上のためには必要である．現在の工業標準化の中ではこれに関する議論が不足しているように思われる．そして，光学式測定機にて最も問題視される異常値の取り扱いに関する考慮も不足しているのが現状である．

そこで我々は光学式表面性状測定機の測定データの信頼性を向上させることを最終的な目標とした．そのために本研究は光学式測定機特有の応答挙動を正しく把握し，これを基に校正用標準片の具体形状に関する設計指針をまとめ，さらに測定データの信頼性に強く影響を与える計測限界の検定方法に関する提案を行うことを目的とした．

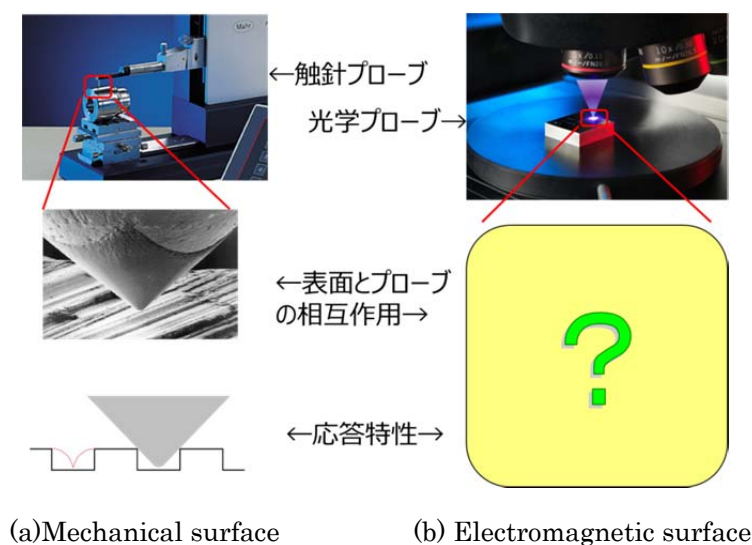


図 1.30 表面とプローブの間の相互作用

(a)の写真は <http://www.mahr.jp/> (b)は <http://www.npl.co.uk> より引用

1.9 本論文の構成と概要

図 1.31 に本論文の全体の構成を示し、以下で各章の概要を述べる。

第 1 章（本章）では最初に工業製品の高度化に伴って構成部品の表面機能の重要性が高まっていることに触れ、光学式表面性状測定機が表面機能の評価手段の 1 つとして有効であることを説明した。そして現在整備が進められている三次元表面性状計測に関する ISO（国際標準化機構）規格の最新動向を要約した。次に、測定座標系の構成要素に注目して各種測定原理の測定機を分類し、座標系の持つ誤差要因について考察した。最後に、光学式表面性状測定機の抱える課題を提示すると共に、これらに関する幾つかの研究事例を紹介した上で、本論文の目的について述べた。

第 2 章では原理の異なる市販測定機を用いて様々な標本の測定結果を比較する。そして異常値の出現は標本の表面波長と関連していることを実験的に明らかにし、これが測定機間の測定データの差異の主原因であることを示す。異常値の出現しない表面波長帯で同一の波長帯で測定データを解析することによって、異機種測定機間であっても、測定データの等価性が高くなることを示す。

第 3 章では鏡面といった弱散乱標本ではなく、多くの一般工業表面が持つような強散乱特性を持つ粗面標本にも対応可能なベクトルシミュレーション手法の開発結果について述べる。ここでは、新たに開発したシミュレーションモデルを使って、電磁場解析手法の 1 つである FDTD 法の基本原理と、偏光のベクトル成分も考慮したベクトル回折理論について述べる。そして、この手法を用いた解析結果は走査型レーザ顕微鏡の異常値を含む実測結果と良い一致を示すことを確認し、シミュレーション結果の妥当性を検証した結果について述べる。

第 4 章では第 3 章で開発したシミュレーション手法を用いて、傾斜平面、正弦波状断面、矩形波状断面、三角波状断面形状に対する走査型レーザ顕微鏡の応答特性を解析し、解析対象面での散乱光の分布から、異常値の発生のメカニズムを考察すると共に、光学式測定

機向けの校正用あるいは検定用の測定標準面（標準片）の設計指針について考察する．

第 5 章では第 4 章で得られた標準片の設計に関する知見を使って，測定機の計測限界の指標である「空間波長検出限界」と「最大局所傾斜角」を検定するための標準片の設計について述べる．そして，この標準片を実際に製作し，いくつかの市販測定機に対して計測限界の検定を行った結果について述べ，異常値の取り扱いに関する一提案を行う．

第 6 章では第 1 ～第 5 章までの結果を総括する．

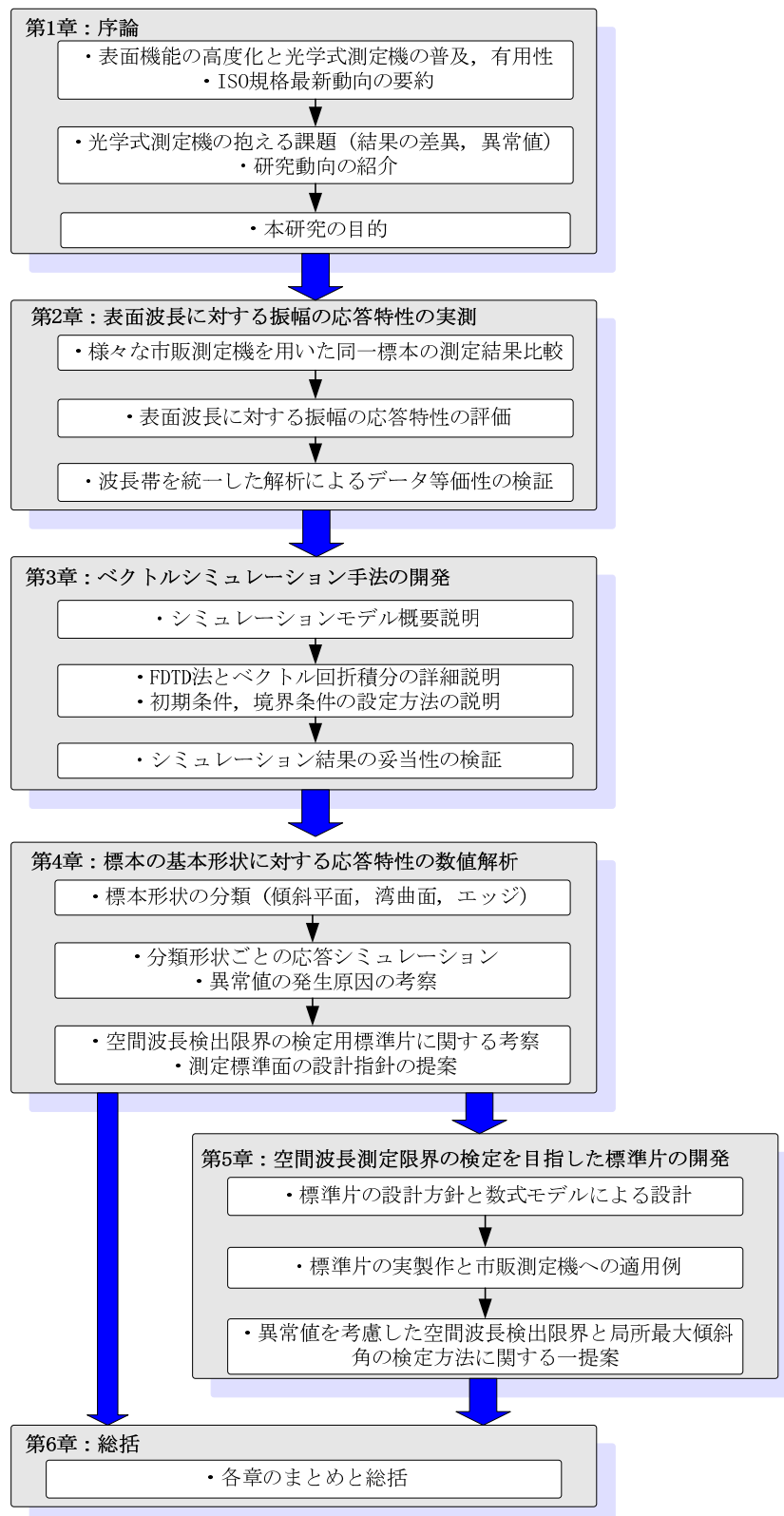


図 1.31 本論文の全体構成

参考文献

- [1] ISO/FDIS 14638:2014, Geometrical Product Specifications (GPS) — Matrix model
- [2] JIS B 0651:2001, 製品の幾何特性仕様(GPS)－表面性状：輪郭曲線方式－触針式表面粗さ測定機の特性
- [3] ISO 3247:1996, Geometrical Product Specifications (GPS) — Surface texture: Profile method — Nominal characteristics of contact (stylus) instruments
- [4] JIS B 0601:2013, 製品の幾何特性仕様(GPS)－表面性状：輪郭曲線方式－用語，定義及び表面性状パラメータ
- [5] JIS B 0633:2001, 製品の幾何特性仕様(GPS)－表面性状：輪郭曲線方式－表面性状評価の方式及び手順
- [6] JIS B 0659-1:2002, 製品の幾何特性仕様(GPS)－表面性状：輪郭曲線方式－測定標準；第1部：標準片
- [7] JIS B 0632:2001, 製品の幾何特性仕様(GPS)－表面性状：輪郭曲線方式－位相補償フィルタの特性
- [8] JIS B 0631:2000, 製品の幾何特性仕様(GPS)－表面性状：輪郭曲線方式－モチーフパラメータ
- [9] JIS B 0670:2002, 製品の幾何特性仕様(GPS)－表面性状：輪郭曲線方式－触針式表面粗さ測定機の校正
- [10] JIS B 0671-1:2002, 製品の幾何特性仕様(GPS)－表面性状：輪郭曲線方式－プラトー構造表面の特性評価－第1部；フィルタ処理及び測定条件
- [11] JIS B 0671-2:2002, 製品の幾何特性仕様(GPS)－表面性状：輪郭曲線方式－プラトー構造表面の特性評価－第2部；線形表現の負荷曲線による高さの特性評価
- [12] JIS B 0671-3:2002, 製品の幾何特性仕様(GPS)－表面性状：輪郭曲線方式－プラトー構造表面の特性評価－第3部；正規確率紙上の負荷曲線による高さの特性評価
- [13] JIS B 0610:2001, 製品の幾何特性仕様(GPS)－表面性状：輪郭曲線方式－転がり円うねりの定義および表示
- [14] ISO/DIS 25178-1:2013, Geometrical Product Specifications (GPS) — Surface texture : Areal — Part1:Indication of surface texture
- [15] ISO 25178-2:2012, Geometrical Product Specifications (GPS) — Surface texture : Areal — Part2; Terms definitions and surface texture parameters
- [16] ISO 25178-3:2012, Geometrical Product Specifications (GPS) — Surface texture : Areal — Part2; Specification operators
- [17] ISO 25178-6:2010, Geometrical Product Specifications (GPS) — Surface texture : Areal — Part2; Classification of methods for measuring surface texture
- [18] ISO 25178-70:2014, Geometrical Product Specifications (GPS) — Surface texture : Areal — Part70; Material measures
- [19] 藤井章弘, 光学式表面性状測定機を対象とした特性評価方法, 2013 年度精密工学会春季大会 シンポジウム資料集,(2013) pp9-11
- [20] Claudiu L Giusca, Richard K Leach, Franck Helary, Calibration of the scales of areal surface topography measuring instruments: Part 2 Amplification, linearity and squareness, Meas. Sci. Technol., 23 (2012) 065005
- [21] Claudiu L Giusca, Richard K Leach, Franck Helary, Tadas Gutauskas and Lakshmi Nimishakavi, Calibration of the scales of areal surface topography-measuring instruments: part

1. Measurement noise and residual flatness, *Meas. Sci. Technol.*, 23 (2012) 035008
- [22] Claudiu L Giusca and Richard K Leach, Calibration of the scales of areal surface topography measuring instruments: part 3. Resolution, *Meas. Sci. Technol.*, 24 (2013) 105010
- [23] A Weckenmann, Ö Tan, J Hoffmann and Z Sun, Practice-oriented evaluation of lateral resolution for micro- and nanometre measurement techniques, *Meas. Sci. Technol.*, 20 (2009) 065103
- [24] Akihiro Fujii, Hitoshi Suzuki, and Kazuhisa Yanagi, A study on response properties of surface texture measuring instruments in terms of surface wavelength, *Proceedings of ASPE Summer Topical Meeting on Precision Interferometric Metrology*, 49 (2010) pp.91-96
- [25] ISO 25178-603 :2013, Geometrical Product Specifications (GPS) — Surface texture : Areal — Part603; Nominal characteristics of non-contact (Phase-shifting interferometric microscopy) instruments
- [26] ISO 25178-605 :2014, Geometrical Product Specifications (GPS) — Surface texture : Areal — Part603; Nominal characteristics of non-contact (Point autofocus probe) instruments
- [27] H. Suzuki, A.Fujii, A study of surface measuring limitation on a laser scanning microscope by the examination of response properties of surface texture and slope detection on a ruby sphere sample, *Proc. 11th euspen Int. Conf., Como, vol1 (2011)p227*
- [28] Wiebke Ehrig, Ulrich Neuschaefer-Rube, Michael Neugebauer, Rudolf Meeß, Traceable optical coordinate metrology applications for the micro range, *Proc. SPIE 7239 (2009) 72390G*, doi: 10.1117/12.810215
- [29] M. Uchidate, T. Shimizu, A. Iwabuchi and K. Yanagi, Generation of reference data of 3D surface texture using the non-causal 2D AR model, *Wear*, 257(2004)1288-1295.
- [30] 根本賢太郎, 柳和久, 明田川正人, 内館道正, 吉田一朗, 面領域の表面性状測定器を対象とした校正及び測定標準に関する研究, *精密工学会誌*, 76, 3(2010)349-353.
- [31] M.Uchidate, K.Yanagi, I.Yoshida, T.Shimizu, A.Iwabuchi, Generation of 3-D random topography datasets with periodic boundaries for surface metrology algorithms and measurement standards, *Wear*, 271(2011)565-570.
- [32] 深津弘也, 岡和彦, 柳和久: 光触針式輪郭形状センサを対象とした微細凹凸面による回折像解析, 2006 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, N-62 (2006) 1101.
- [33] Dorsch, RG, Häusler G, Herrmann JM, Laser triangulation: fundamental uncertainty in distance measurement, *Applied Optics*, vol. 33, no 7, (1994) pp. 1306- 1314.
- [34] 清野慧, 孫 萍, 大江敦司, 光触針におけるオーバーシュート現象の考察, *精密工学会誌*, vol.62, no.1 (1994) pp.140-144
- [35] Akiko Harasaki and James C. Wyant, Fringe modulation skewing effect in white-light vertical scanning interferometry, *Applied Optics*, vol39, no.13(2000)pp2102-2106
- [36] T. V. Vorburger, H.G. Rhee, T. B. Renegar, J.F. Song, A. Zheng, Comparison of optical and stylus methods for measurement of surface texture, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol33, issue1-2(2007)pp110-118
- [37] Hyug-Gyo Rhee, Theodore V. Vorburger, Jonathan W. Lee, and Joseph Fu, Discrepancies between roughness measurements obtained with phase-shifting and white-light interferometry, *Applied Optics*, vol44, no.28(2005)pp5919-5927
- [38] F Gao, R K Leach, J Petzing and J M Coupland, Surface measurement errors using commercial scanning white light interferometers, *Meas. Sci. Technol.*, 19 (2008) 015303

- [39] Peter Lehmann, Vertical scanning white-light interference microscopy on curved microstructures, *Optics Letters*, vol.35, no.11(2010)pp1768-1770
- [40] Peter Lehmann, Weichang Xie, and Jan Niehues, Transfer characteristics of rectangular phase gratings in interference microscopy, *Optics Letters*, vol.37, no.4(2012)pp758-760
- [41] Weichang Xie, Peter Lehmann, and Jan Niehues, Lateral resolution and transfer characteristics of vertical scanning white-light interferometers, *Applied Optics*, vol.51, issue11 (2012) pp.1795-1803
- [42] R. K. Leach; C. L. Giusca; J. M. Coupland, Advances in calibration methods for micro- and nanoscale surfaces, *Proc. of SPIE*, vol.8430(2012)84300H-1
- [43] 深津弘也, 柳 和久, 共焦点式輪郭測定センサを対象とした異常値低減法の開発, 精密工学会誌, 79, 3(2013)pp248-252
- [44] 齋藤輝明, 花田 光, 柳 和久, 高低差の累積確率曲線を利用した表面凹凸データの異常値検出法, 設計工学, vol.41, no.6(2006)pp315-320
- [45] Mohd Fauzi Ismail, Kazuhisa Yanagi and Akihiro Fujii, An outlier correction procedure and its application to areal surface data measured by optical instruments, *Meas. Sci. Technol.*, vol.21(2010) 105105
- [46] G Le Goic, C A Brown, H Favreliere, S Samper and F Formosa, Outlier filtering: a new method for improving the quality of surface measurements, *Meas. Sci. Technol.*, vol.24(2013) 015001
- [47] Peter Lehmann, Optical versus tactile geometry measurement: alternatives or counterparts, *Proc. of SPIE*, vol.5144(2003), doi:10.1117/12.508360
- [48] 吉田一郎, 塚田忠夫, 表面粗さにおける不確かさに及ぼす触針先端半径の影響 (第 1 報 : FFT による解析) , 設計工学, vol.39, no.8(2004)pp450-455
- [49] 吉田一郎, 塚田忠夫, 表面粗さにおける不確かさに及ぼす触針先端半径の影響 (第 2 報 : フラクタル的性質をもつプロファイルによるシミュレーション) , 設計工学, vol.40, no.2(2005)pp91-96

第2章 表面波長に対する振幅の応答特性の実測

光学式測定機では方式の異なる測定機間のデータは必ずしも等価性が得られるものではなく、信頼性の観点からは触針走査方式の測定機には及ばないのが現状である。そこで本章では原理の異なる市販測定機を用いて様々な標本の測定結果を比較する。そして異常値の出現は標本の表面波長と関連していることを実験的に明らかにし、これが測定機間の測定データの差異の主原因であることを示す。異常値の出現しない表面波長帯の中で同一の波長帯で測定データを解析することによって、異機種測定機間であっても、測定データの等価性が高くなることを示す。

2.1 表面波長と振幅の応答の関連[1]-[3]

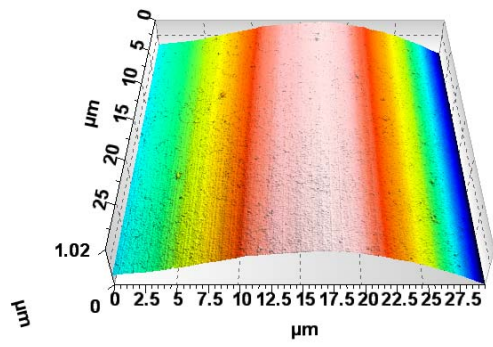
2.1.1 評価の対象とした測定機および測定標本

光学式表面性状測定機として共焦点顕微鏡法の1つである走査型レーザ顕微鏡 (LSM)、垂直走査低コヒーレンス干渉法 (CSI)、点合焦輪郭曲線法 (AF) を用いた。対物レンズの視野内で測定を行う LSM と CSI に関しては異なる NA の対物レンズにより測定条件も変更した。また、光学式測定機との比較のために触針走査法(Stylus)についても評価した。表 2.1 に使用した測定機の測定条件を示す。

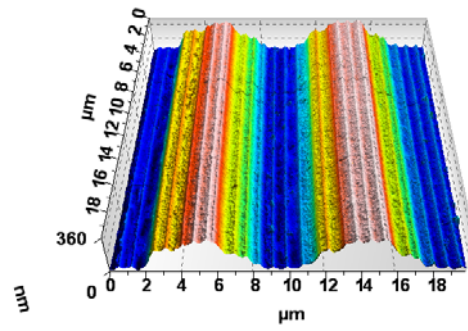
測定標本は断面形状が正弦波又は矩形波状のグレーティングを用いた。表 2-2 に測定対象標本の一覧と、図 2.1 にこれら一部の標本の原子間力顕微鏡 (AFM) による測定結果を示す。グレーティング構造の基本周期（以下では表面波長と呼ぶ）ごとに各測定機により得られる高さ方向の振幅の応答の違いを解析した。

表 2.1 評価の対象とした市販の測定機

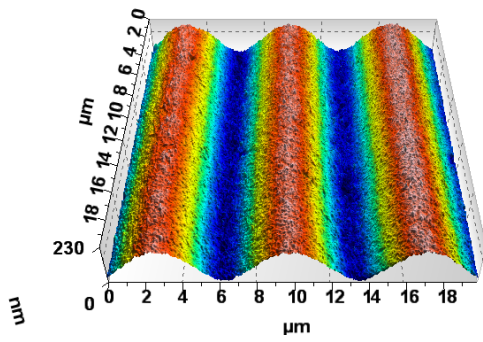
測定機の種類	測定条件
走査型レーザ顕微鏡(LSM) (共焦点顕微鏡法)	20x NA0.60
	50x NA0.95
	100x NA0.95
垂直走査低コヒーレンス干渉法 (CSI)	20x NA0.40
	50x NA0.55
点合焦輪郭曲線法(AF)	100x NA0.80
触針走査法 (Stylus)	Tip radius 2 μ m



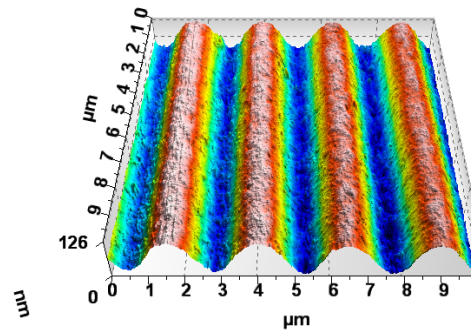
(a)Rubert No.528($P=50\mu\text{m}$, $D=1.5\mu\text{m}$)



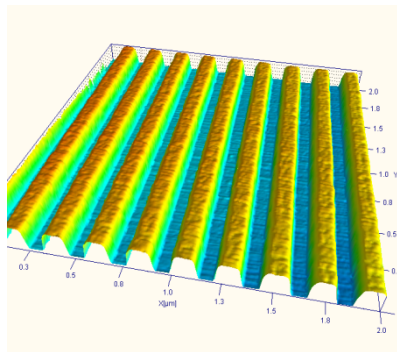
(b)Rubert No.529($P=10\mu\text{m}$, $D=0.3\mu\text{m}$)



(c)Rubert No.542($P=8\mu\text{m}$, $D=0.2\mu\text{m}$)



(d)Rubert No.543($P=2.5\mu\text{m}$, $D=0.12\mu\text{m}$)



(e)Line & space ($P=0.24\mu\text{m}$, $D=0.1\mu\text{m}$)

図 2.1 振幅の応答評価に用いた標本の AFM 測定結果

表 2.2 グレーティング標本一覧

Specimen	Nominal Surface Wavelength (μm)	Nominal Amplitude (μm)	waveshape
Rubert No.531	100	1	Sinusoidal
Rubert No.528	50	1.5	
Rubert No.529	10	0.3	
Rubert No.542	8	0.2	
Rubert No.543	2.5	0.12	
NTT-AT NIM-PH350	20, 6, 4, 2, 1.6, 1.2, 1.0, 0.8, 0.7	0.35	Rectangular
Line & Space (resist pattern)	0.4, 0.36, 0.32, 0.28, 0.24	0.1	

2.1.2 測定結果

図 2.2～2.4 は各測定機により得られる測定断面曲線である。但し(g)Stylus だけは $\lambda_s=2.5\mu\text{m}$ の LPF (Low-Pass-Filter) 処理が施されている（つまり断面曲線¹である）。グラフは上から使用した対物レンズの NA の大きな順番に並べ、最後に Stylus による結果を表示した。

図 2.2 に示すような表面波長 P が比較的長い ($=50\mu\text{m}$) 標本の場合、どの測定機、どの対物レンズでもほぼ等しい振幅として測定された。

一方、図 2.3 や図 2.4 に示すように、表面波長が短く ($8\mu\text{m}$ や $2.5\mu\text{m}$) なるに連れて、NA が小さい条件ほど測定される振幅が公称振幅よりも大きくなっていく。このことから測定される正弦波の振幅は NA に影響を受けると言える。なお、図 2.4 の(g)Stylus のデータが公称振幅よりも小さくなっている理由は $\lambda_s=2.5\mu\text{m}$ の LPF の影響である。

図 2.5 はさらに表面波長を短くした場合である。ここでは図 2.4 で公称値どおりの振幅値が測定できた LSM の(a)100x, NA 0.95 に対して振幅の等しい 5 種類の表面波長 ($P=0.4\sim 0.24\mu\text{m}$) の標本の測定結果を比較した。測定の際には水平方向のサンプリング間隔の影響を無視するために、表面波長の 1/15 以下のサンプリング間隔 $dx=0.016\mu\text{m}$ と十分小さな値とした。(a1)では測定される振幅は公称振幅である $0.1\mu\text{m}$ よりも大きな約 $0.15\mu\text{m}$ の振幅として測定された。表面波長が短くなるにつれ(a2)～(a5)では振幅が徐々に小さくなった。図 2.1(e)で示したような AFM による実測結果では 5 種類の標本の振幅は全て $0.09\sim 0.1\mu\text{m}$ でありほぼ公称値通りであったことから、(a1)～(a3)は実際よりも大きな振幅で、(a5)は小さな

¹ JIS B0651:2001 では断面曲線とは「測定断面曲線にカットオフ値 λ_s の低域フィルタを適用して得られる曲線」と定義されている。

振幅で測定されたことになる。

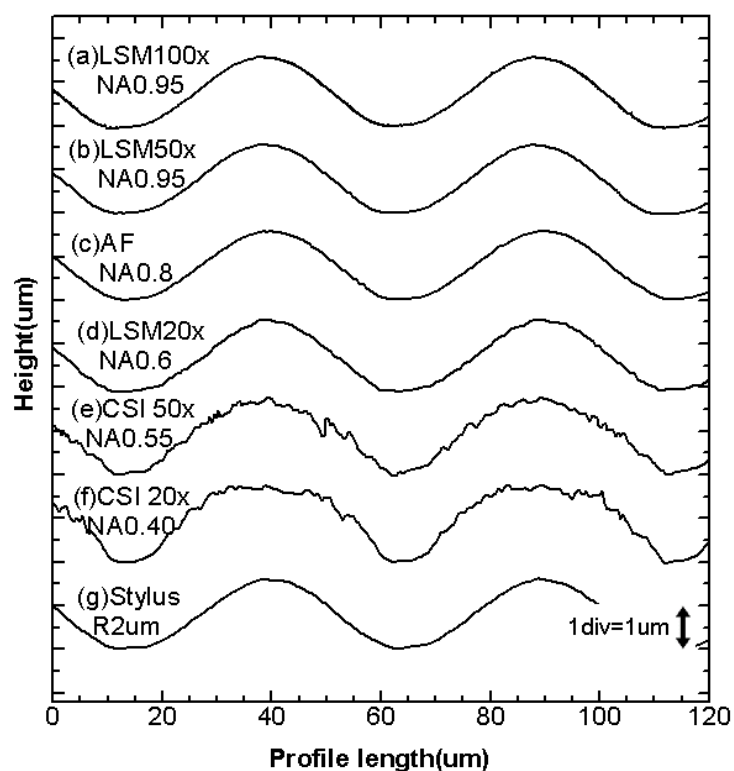


図 2.2 Rubert No.528 ($P=50\mu\text{m}$, $D=1.5\mu\text{m}$) の測定結果

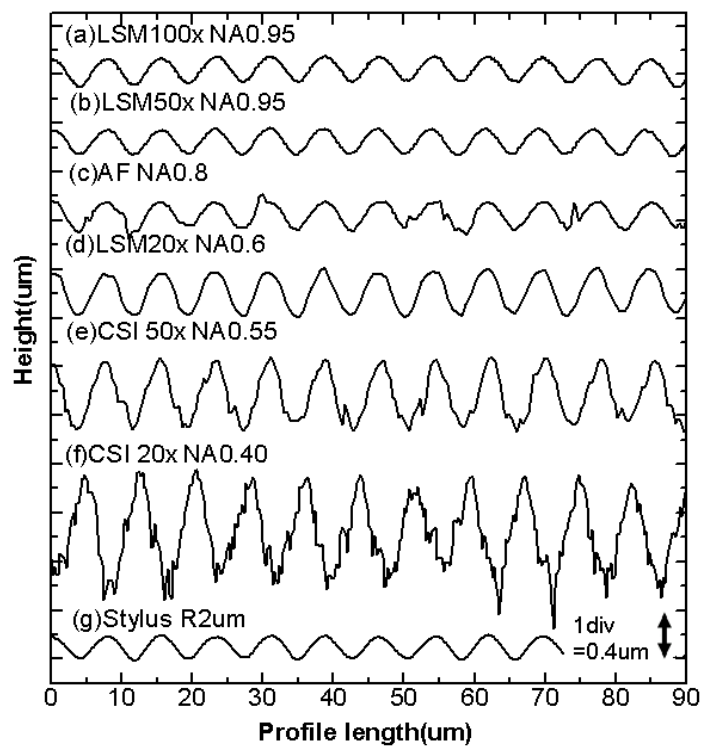


図 2.3 Rubert No.542 ($P=8\mu\text{m}$, $D=0.2\mu\text{m}$) の測定結果

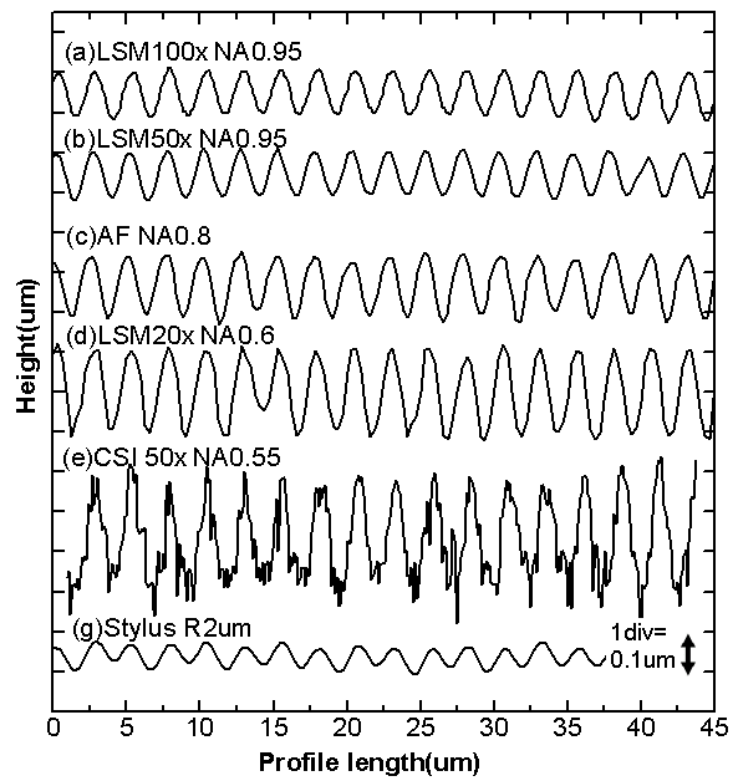


図 2.4 Rubert No.543 ($P=2.5\mu\text{m}$, $D=0.12\mu\text{m}$) の測定結果

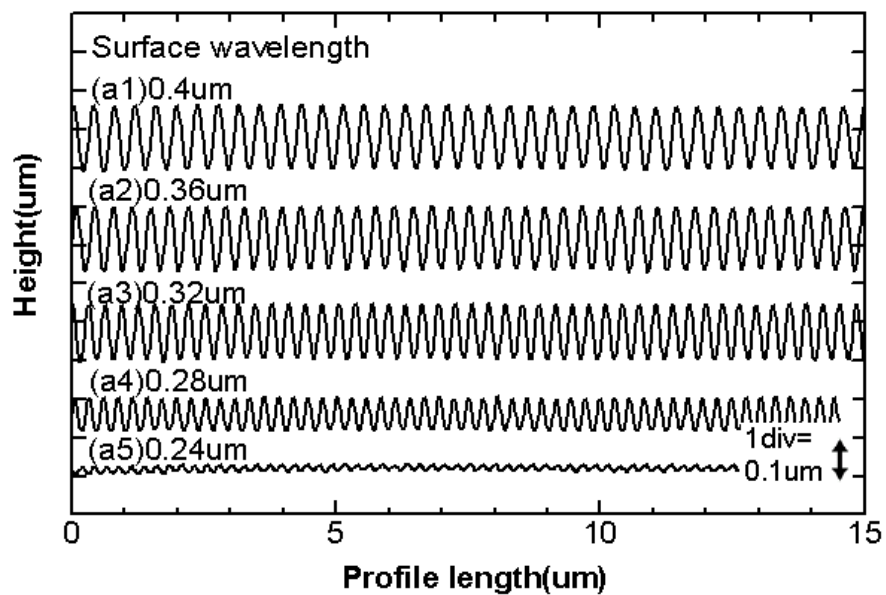


図 2.5 LSM による Line & space 標本($P=0.4\sim 0.24\mu\text{m}$, $D=0.1\mu\text{m}$) の測定結果

2.1.3 表面波長に対する振幅の応答

図 2.6 に示すように、測定された振幅を公称振幅で除した値を振幅の応答と定義し、これを各測定機について表面波長に対する振幅の応答としてまとめたものが図 2.7 である。

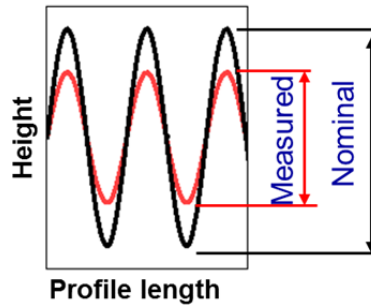


図 2.6 振幅の応答（Amplitude response）の算出方法

図 2.7 より、比較的表面波長の長い 20～100 μm の領域では、どの測定機、測定条件においても振幅の応答は等しく 1、つまり正しい振幅として測定されている。表面波長が 10 μm 以下の領域では振幅の応答特性が 1 以上となる場合が見られるようになる。これが光学式測定機特有の現象である異常値の影響と思われる。例えば図 2.4(d)のような過剰に振幅が応答しているような場合がこれに相当する。このような過剰に応答する現象は測定機や測定条件によって発生する表面波長が異なるため、これが異機種間の測定データの差異を発生させる原因であると思われる。

LSM のデータ図 2.7(a),(b)に関しては、応答が 1 以上の異常値が発生するのはおよそレーザの集光スポット径（ $\div \lambda / NA = 0.405 \mu\text{m} / 0.95 \div 0.4 \mu\text{m}$ ）と同程度の表面波長領域となっている。異常値はレーザスポット径内の凹凸に起因した強い散乱現象やスペックルが原因であるとも言われており[4]-[6]、今回の測定結果はこの現象が表面波長に対する振幅の応答特性の実測値に現れたものと考えられる。この異常値の発生する領域よりもさらに短い波長域（< 0.4 μm ）では振幅の応答は急激に低下する。この現象は光学式に限ったことではなく、使用するプローブ（触針や集光スポット）の大きさに起因した短波長の応答の低下と思われる。(a), (b)においてほぼ同じ応答特性を示したのは、対物レンズの NA に連動してレーザスポット径が概ね同等になったためと思われる。

このような表面波長に対する振幅の応答特性は測定機の計測特性を検定する上では重要

な特性である。本章では標本の断面波形として正弦波状や矩形波状といった異なる性質の標本を利用したため、統一的な評価方法に基づいた評価結果とするには不十分な点もあるが、測定機ごとの測定結果の差異を表面波長に対する振幅の応答とに関連があることを提示できたことは1つの前進であると考え、表面波長に対する振幅の応答特性をさらに厳密に評価する方法については第5章で別途述べる。

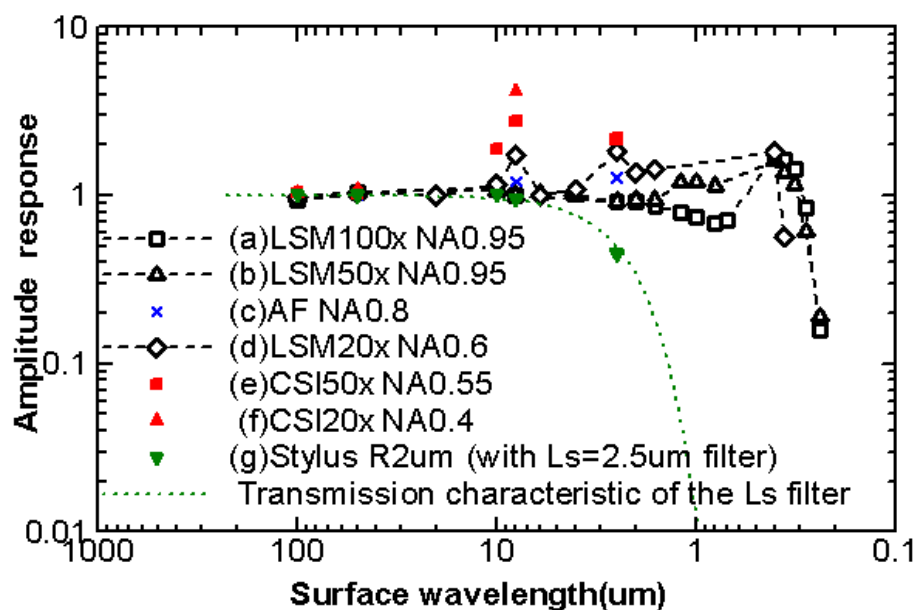


図 2.7 表面波長に対する振幅の応答特性

2.2 解析波長帯を統一した比較

次に異種測定機間での測定データの等価性を向上する方法について考える．前節で振幅の応答が1より大きくなる場合のデータが測定機間の測定データの差異を発生させていると述べた．そうであるならば応答が1の表面波長域（応答がフラットな波長帯）のデータだけを解析対象とし，この範囲内の同一解析波長帯で比較すれば異機種間であっても測定データの等価性が向上すると考えた．

図 2.8 は図 2.7 の(d)LSM と(g)Stylus の応答データを抜粋したものである．ピンク色で塗りつぶした領域は，2 種の測定機の応答が共に概略 1 となる領域を抽出するためのガウシアンフィルタ [7] ($\lambda_c=0.25\text{mm}$, $\lambda_s=2.5\mu\text{m}$) の振幅伝達特性を示している．図 2.9 はこの 2 種の測定機 (LSM, Stylus) で同一の標本の同一箇所を測定した結果である．(a)はフィルタ処理無しの LSM の測定断面曲線，(b)(c)は LSM と Stylus のデータに帯域制限（図 2.8 のハッチング部）をかけた断面曲線である．波長帯を統一した(b)と(c)の比較では，統一しない(a)と(c)の比較に比べ断面プロファイルの一致度合いが向上しているのが分かる．

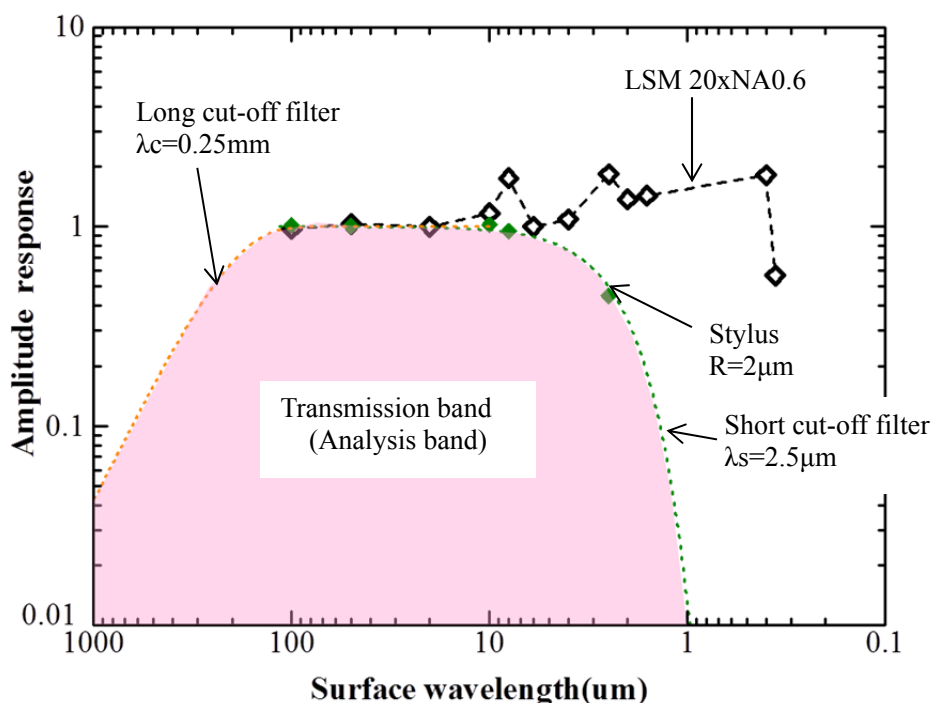
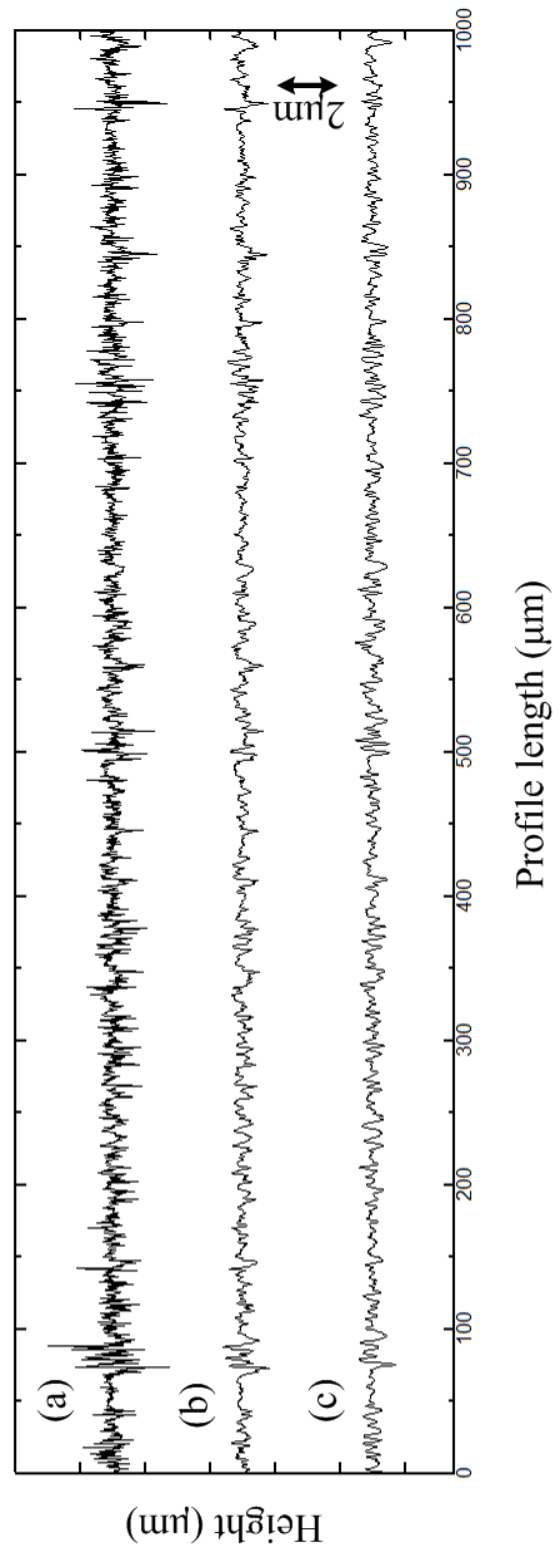


図 2.8 解析波長帯の統一



(a)LSM(20x NA0.60) 帯域制限フィルターなし
 (b)LSM(20x NA0.60) 帯域制限 $\lambda_s=2.5 \mu\text{m}$, $\lambda_c=0.25\text{mm}$
 (c)Stylus($R=2 \mu\text{m}$) 帯域制限 $\lambda_s=2.5 \mu\text{m}$, $\lambda_c=0.25\text{mm}$
 図 2.9 解析波長帯の統一の効果 (標本 : Rubert 社製 No.504)

図 2.10 は Stylus(Tip radius $2\mu\text{m}$)と LSM(20xNA0.60, 50xNA0.95)を用いた Rz の測定結果を比較したものである。測定対象とした標本は JIS で定められたタイプ D1 の粗さ標準片[8]を 7 種類用いた。同図より解析波長帯を統一した(b)では、(a)に比べ等価性が向上することが分かる。

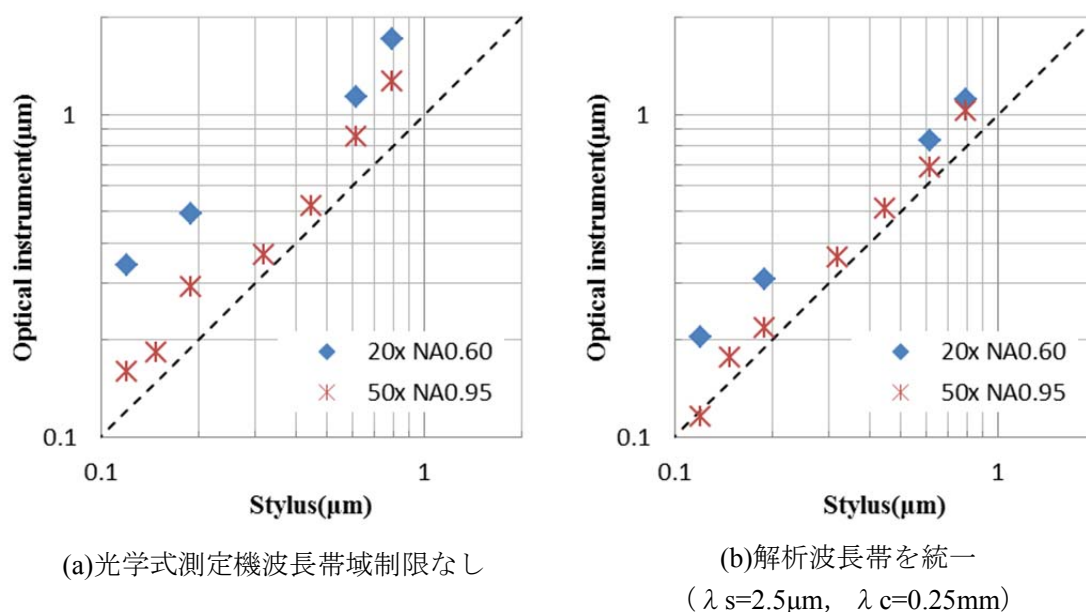


図 2.10 触針式と光学式測定機の Rz 値の比較

標本：Halle 社製 No.5345, No.5344, No.3537 [9]

Rubert 社製 No.501, No.502, No.503, No.504 [10]

以上で示したように、振幅の応答がフラットな波長領域で解析波長帯を統一すれば、異機種測定機間であってもデータの等価性が向上できることが分かった。そのためにも、表面波長に対する振幅の応答特性を正しく検定することは全ての測定機にとって重要なことであると言える。

2.3 まとめ

1. 表面波長に対する振幅の応答は測定機や測定条件ごとに独自の特性を示し，このような応答特性の違いが異機種間の測定データの差異となっていることを実験的に確認した．また，短波長域において異常値が出現しやすい傾向があることも明らかにした．
2. 波長帯を統一して解析することにより，異機種間の測定データの等価性が向上することを確認した．
3. 表面波長に対する振幅の応答特性を正しく検定することは測定データの信頼性向上にとって重要であることを述べた．

参考文献

- [1] Akihiro Fujii, Hitoshi Suzuki, and Kazuhisa Yanagi, A study on response properties of surface texture measuring instruments in terms of surface wavelength, Proceedings of ASPE Summer Topical Meeting on Precision Interferometric Metrology, 49 (2010) pp.91-96
- [2] 藤井章弘, 柳 和久, 表面性状測定機における表面波長に対する応答特性の一考察, 2009 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, G33(2009)pp.495-496
- [3] 藤井章弘, 藤本洋久, 3D 測定レーザー顕微鏡 OLS4000 による 3D 表面性状計測, O plus E, vol.31, no.6(2009)pp.640-644
- [4] 深津拓也, 岡和彦, 柳和久: 光触針式輪郭形状センサを対象とした微細凹凸面による回折像解析, 2006 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, N-62 (2006) 1101.
- [5] Dorsch, RG, Häusler G, Herrmann JM, Laser triangulation: fundamental uncertainty in distance measurement, Applied Optics, vol. 33, no 7, (1994) pp. 1306- 1314.
- [6] 清野慧, 孫 萍, 大江敦司, 光触針におけるオーバーシュート現象の考察, 精密工学会誌, vol.62, no.1 (1994) pp.140-144
- [7] JIS B0632:2001, 製品の幾何特性仕様(GPS)－表面性状：輪郭曲線方式－位相補償フィルタの特性
- [8] JIS B 0659-1:2002, 製品の幾何特性仕様(GPS)－表面性状：輪郭曲線方式－測定標準；第 1 部：標準片
- [9] Halle 社 <http://www.halle-normale.de/>
- [10] Rubert 社 <http://www.rubert.co.uk/>

第3章 ベクトルシミュレーション手法の開発

本章では鏡面などの弱散乱標本ではなく、多くの一般的な工業表面が持つような強散乱特性を持つ粗面標本にも対応可能なベクトルシミュレーション手法について述べる。ここでは、新たに開発したシミュレーションモデルを使って、電磁場解析手法の1つである FDTD 法の基本原理と、偏光のベクトル成分も考慮したベクトル回折理論について述べる。そして、この手法を用いた解析結果は異常値を含む実測結果と良い一致を示すことを確認し、シミュレーション結果の妥当性を検証した結果について述べる。

3.1 スカラー解析とベクトル解析

光学式表面性状測定機の応答特性を解析するためには、光学式測定機固有の現象で測定結果に強く影響するとされる異常値の発生について考慮すべきである。第1章でも述べたように異常値は測定対象の表面での強い散乱やスペックルが関連しているといわれるが、凹凸のない弱散乱物体を解析対象の前提条件とするスカラー光学理論ではこれらの現象を取り扱えない。そこで本研究ではベクトル解析技術の1つである FDTD 法(Finite-Difference Time-Domain method)[1] およびベクトル回折理論を用いて応答特性の解析を行った。

3.2 シミュレーション手順の概要と数値解析モデル

多くの光学式測定機は測定対象物の表面に光を照射し、その散乱光を受光することを基本原理として輪郭面の計測を行う[2]。中でも共焦点顕微鏡法の一つである走査型レーザ顕微鏡（以下、LSM と表す）は標本の1点に光を照射し、結像面の1点で標本からの散乱光強度を検出するので、測定原理が単純である[3]。そこで本研究では代表的な光学式測定機の一例として LSM を解析対象とした。図 3.1 に本シミュレーションでの数値解析モデルの概略図を示す。本シミュレーションでは図に示すようにレーザ光を対物レンズにて集光し、解析対象とする標本モデル表面の1点を照明¹する。標本モデルで散乱したレーザ光を再び

¹ 正確に言うと無限に小さな1点を照明しているのではなく、光の回折限界まで絞り込んだ集光スポットの大きさをもった1箇所を照明している。

対物レンズにて集光しピンホール越しの光検出器にてその強度を検出する．光学系全体と標本モデルを相対的に X, Y, Z 軸方向に動かしながら上記のような光強度の検出を行うことで，標本モデル表面付近の 3 次元空間上の任意の点に対する光検出強度の分布(Intensity map)を得る．表面の輪廓形状はこの分布を基に算出する．

次節以降で図 3.2 に示したシミュレーション全体のフローの順番に従って，詳細手順を説明する．

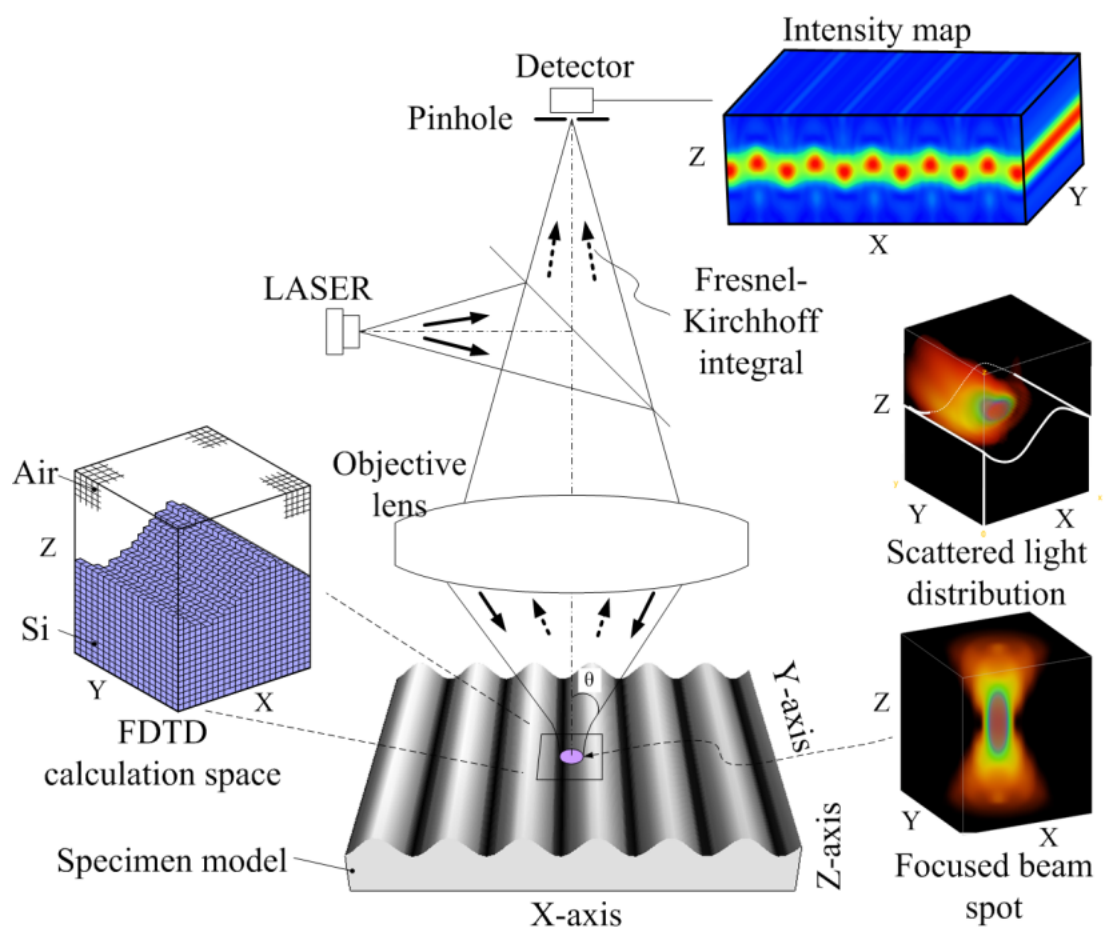


図 3.1 シミュレーションモデル概要

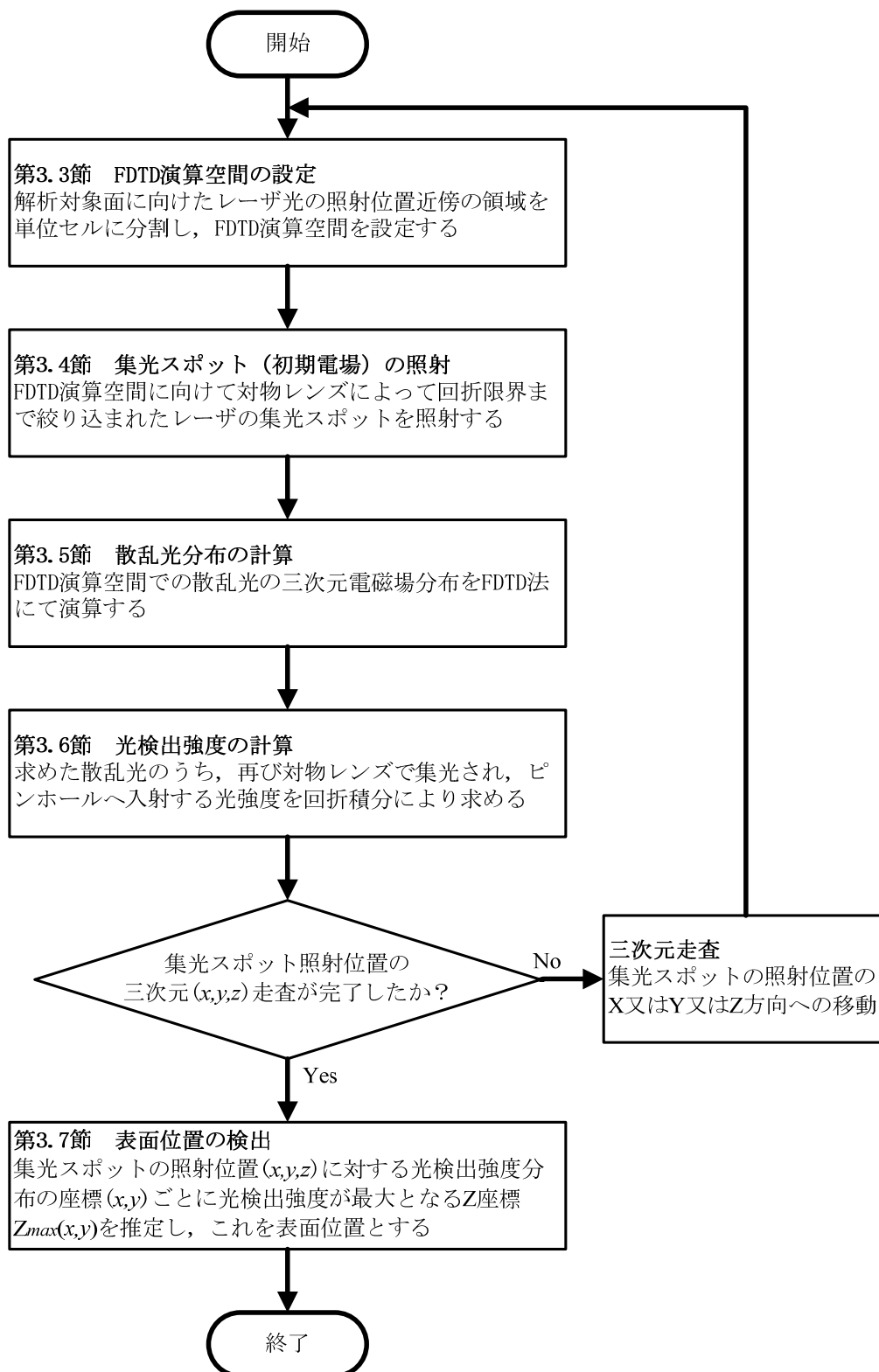


図 3.2 シミュレーションのフロー

3.3 FDTD 演算空間[4][5]

図 3.3 で示すように、解析対象面のレーザー光照射位置の近傍に FDTD 演算空間(FDTD calculation space)を設定し、この空間内を小さな直方体の Yee セルと呼ばれる単位セルに分割する。FDTD 法では単位セルの総数がメモリー量と演算量（演算時間）を決定するため、演算コストを抑えるために必要最小限の FDTD 演算空間の大きさに設定する。本研究では標本表面近傍での光の散乱領域を包含できるように光の集光スポットサイズの数倍（本研究では約 3～4 倍）を一辺とする直方体となるように FDTD 演算空間の大きさを設定した。一般に、単位セルの大きさは解析対象とする電磁波（光）の波長の 1/10 以下であることが必要とされる。本研究では光源波長の 1/20～1/30 の大きさに設定した。各単位セルには図のような位置と向きで電磁場(E_x, E_y, E_z), (H_x, H_y, H_z)を設定する。FDTD 法の詳細は第 3.5 節で説明するが、FDTD 法は全ての単位セルについて時系列でマクスウェル方程式を解き、解析対象空間の電磁場分布を求める演算手法である。単位セルの大きさを $\Delta x \times \Delta y \times \Delta z$ とし i, j, k, n を自然数とすると、FDTD 演算空間の位置と時間の座標は $(x, y, z, t) = (i\Delta x, j\Delta y, k\Delta z, n\Delta t)$ で与えられる。

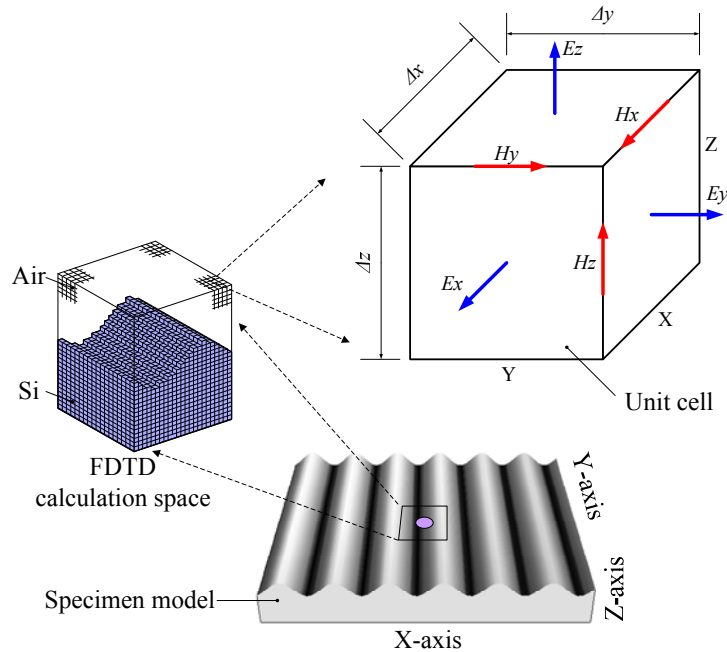


図 3.3 解析対象空間と単位セル内の電場、磁場の配置

3.4 集光スポット（初期電場）の照射

FDTD 演算空間に向けて対物レンズによるレーザ光の集光スポット（PSF: Point Spread Function）を電場の初期条件として与えた．PSF の算出にはスカラー回折理論ではなく，ベクトル回折理論[6]を用いた．これはスカラー回折理論の枠組みでは無視される光の伝播方向（ z 方向）の偏光成分も考慮するものであり，走査型レーザ顕微鏡のように高い NA を持つ光学システムを対象とする場合には高精度の近似が可能な手法である．以下にベクトル回折理論を用いた PSF の算出について述べる．

3.4.1 ベクトル回折理論[6]

図 3.4 に示すように入射瞳上の面積素片 a ，及び球面上の面積素片 a' を考えると，それぞれの光の電場は式(3-1)で与えられる

$$|E_{a'}| = |E_a| \sqrt{\cos \theta} \quad (3-1)$$

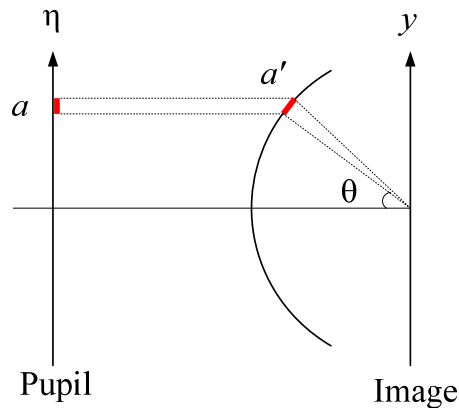


図 3.4 光束断面積の変化

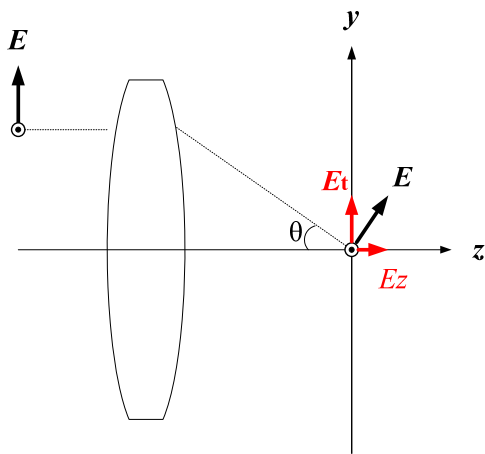


図 3.5 像面における入射光の面内成分 E_t と光軸方向成分 E_z

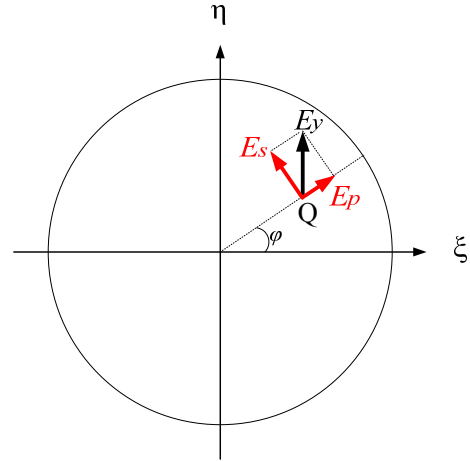


図 3.6 入射光の P,S 偏光成分への分解

図 3.5 に示すように、光線が紙面内にあるとすると像面に P 偏光で入射してくる光の寄与は

$$|E_t| = |E| \cos \theta, \quad |E_z| = |E| \sin \theta \quad (3-2)$$

であり、S 偏光で入射してくる光に対しては

$$|E_t| = |E|, \quad E_z = 0 \quad (3-3)$$

である。ここで E_t は電場の像面内成分である。

図 3.6 は、瞳を光の像面側から見た図である。図より点 $Q(\xi, \eta)$ における入射光の電場成分 E_y を P 偏光成分 E_p と S 偏光成分 E_s に分けると

$$E_p = E_y \sin \varphi = E_y \frac{\eta}{\sqrt{\xi^2 + \eta^2}} \quad (3-4)$$

$$E_s = E_y \cos \varphi = E_y \frac{\xi}{\sqrt{\xi^2 + \eta^2}} \quad (3-5)$$

となる. 式(3-2),(3-3)から E_p の面内成分に $\cos \theta$ が, z 成分に $\sin \theta$ が掛かることを考えると, 像面上の電場ベクトル成分を改めて (E_x, E_y, E_z) とおくと, これらは E_p と E_s を用いて次のように表すことができる.

$$E_x = E_p \cos \theta \cos \varphi - E_s \sin \varphi \quad (3-6)$$

$$E_y = E_p \cos \theta \sin \varphi + E_s \cos \varphi \quad (3-7)$$

$$E_z = E_p \sin \theta \quad (3-8)$$

式(3-6)～(3-8)に式(3-4),(3-5)を代入し, $\sin \theta = \sqrt{\xi^2 + \eta^2}$, $\cos \theta = \zeta$ であること, 及び式(3-1)を考慮して, 点 $Q(\xi, \eta)$ からの電場の寄与は

$$\delta E_x^{\xi, \eta} = \frac{\xi \eta}{\xi^2 + \eta^2} \sqrt{\zeta} (\zeta - 1) \exp\{ik(\xi x + \eta y - \zeta z)\} dS \quad (3-9)$$

$$\delta E_y^{\xi, \eta} = \frac{\xi^2 + \eta^2 \zeta}{\xi^2 + \eta^2} \sqrt{\zeta} \exp\{ik(\xi x + \eta y - \zeta z)\} dS \quad (3-10)$$

$$\delta E_z^{\xi, \eta} = \eta \sqrt{\zeta} \exp\{ik(\xi x + \eta y - \zeta z)\} dS \quad (3-11)$$

となる. 積分変数 dS は単位球面上の面積素片であるから,

$$dS = \frac{d\xi d\eta}{\zeta} \quad (3-12)$$

が成り立ち, これを用いて変数変換すると,

$$E_x = C \iint_a \exp\{ik(\xi x + \eta y - \zeta z)\} \frac{\xi \eta}{\xi^2 + \eta^2} \left(\sqrt{\zeta} - \sqrt{\frac{1}{\zeta}} \right) d\xi d\eta \quad (3-13)$$

$$E_y = C \iint_a \exp\{ik(\xi x + \eta y - \zeta z)\} \frac{1}{\xi^2 + \eta^2} \left(\eta^2 \sqrt{\zeta} + \xi^2 \sqrt{\frac{1}{\zeta}} \right) d\xi d\eta \quad (3-14)$$

$$E_z = C \iint_a \exp\{ik(\xi x + \eta y - \zeta z)\} \eta \sqrt{\frac{1}{\zeta}} d\xi d\eta \quad (3-15)$$

が得られる．

ここまでは入射光が y 方向に偏光している場合について述べたが， x 方向に偏光している場合も同様の数式展開を行い，すべての偏光成分を考慮したベクトル回折の一般式として次の式を得る．

$$\begin{aligned} \mathbf{E}(x, y, \xi_s, \eta_s) = C \iint_{-\infty}^{\infty} d\xi' d\eta' \mathbf{V}(\xi' + \xi'_s, \eta' + \eta'_s, \zeta'_d) \mathbf{G}'(\xi' + \xi'_s, \eta' + \eta'_s) \\ \times \tilde{\mathbf{E}}(\xi, \eta, \xi_s, \eta_s) \sqrt{\frac{\zeta_d}{\zeta_s}} \exp\{ik[(\xi' + \xi_s)x + (\eta' + \eta'_s)y]\} \end{aligned} \quad (3-16)$$

但し，

$$\zeta'_d = \sqrt{1 - (\xi' + \xi'_s)^2 + (\eta' + \eta'_s)^2} \quad (3-17)$$

この電場 $\mathbf{E}(x, y, \xi_s, \eta_s)$ が FDTD 演算で用いる電場の初期値となる．ここで， $\mathbf{E}(x, y, \xi_s, \eta_s)$ および $\tilde{\mathbf{E}}(\xi, \eta, \xi_s, \eta_s)$ はそれぞれ照明光の入射角が (ξ_s, η_s) であるときの像面上の電場および瞳面上の電場である．なお， (ξ', η') は出射瞳座標であり，入射瞳座標 (ξ, η) と区別するために「'」をつけた．また式(3-13)～(3-15)で示したような指数関数の z に関する項は瞳関数 \mathbf{G}' にデフォーカス波面収差として繰り込まれている．

像面上の電場および瞳面上の電場は，

$$\mathbf{E}(x, y, \xi_s, \eta_s) = \begin{pmatrix} E_x(x, y, \xi_s, \eta_s) \\ E_y(x, y, \xi_s, \eta_s) \\ E_z(x, y, \xi_s, \eta_s) \end{pmatrix} \quad (3-18)$$

$$\tilde{\mathbf{E}}(\xi, \eta, \xi_s, \eta_s) = \begin{pmatrix} \tilde{E}_x(\xi, \eta, \xi_s, \eta_s) \\ \tilde{E}_y(\xi, \eta, \xi_s, \eta_s) \end{pmatrix} \quad (3-19)$$

と表せる．瞳面の電場が二次元であるのに対し，像面が三次元である理由は先にも述べたように，光の伝播方向（ z 方向）の偏光成分を考慮した結果である．瞳から像までの伝播における振幅変化を表す3行2列の行列 \mathbf{V} は次の式で与えられる．

$$\mathbf{V}(\xi, \eta, \zeta) = \begin{pmatrix} \frac{1}{\xi^2 + \eta^2} \left(\xi^2 \sqrt{\zeta} + \eta^2 \sqrt{\frac{1}{\eta}} \right) & \frac{\xi \eta}{\xi^2 + \eta^2} \left(\sqrt{\zeta} - \sqrt{\frac{1}{\eta}} \right) \\ \frac{\xi \eta}{\xi^2 + \eta^2} \left(\sqrt{\zeta} - \sqrt{\frac{1}{\eta}} \right) & \frac{1}{\xi^2 + \eta^2} \left(\eta^2 \sqrt{\zeta} + \xi^2 \sqrt{\frac{1}{\eta}} \right) \\ \xi \sqrt{\frac{1}{\eta}} & \eta \sqrt{\frac{1}{\eta}} \end{pmatrix} \quad (3-20)$$

集光スポット上の強度分布，つまり PSF は次式で与えられる．

$$I_E(x, y, \xi_s, \eta_s) = \varepsilon \left(|E_x(x, y, \xi_s, \eta_s)|^2 + |E_y(x, y, \xi_s, \eta_s)|^2 + |E_z(x, y, \xi_s, \eta_s)|^2 \right) \quad (3-21)$$

3.4.2 スカラー回折理論との比較

$\xi_s = \eta_s = 0$ とした場合に(3-21)式により求められる PSF の空間的な強度分布の演算例を図 3.7～3.9 に示す．強度プロファイルのグラフの点線は次式(3-22a)～式(3-22d)で表されるベクトルを考慮しないスカラー近似の回折計算の結果[7]であり，ここでは参考としてプロットした．

$$I(v) = \left(\frac{2J_1(v)}{v} \right)^2 \quad (3-22a)$$

$$v = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{x^2 + y^2} \sin \theta \quad (3-22b)$$

$$I(u) = \left(\frac{\sin(u/4)}{u/4} \right)^2 \quad (3-22c)$$

$$u = \frac{8\pi}{\lambda} z \sin^2 \left(\frac{\theta}{2} \right) \quad (3-22d)$$

ここで J_1 は第 1 種第 1 次のベッセル関数である, θ は対物レンズの標本面上の光軸と開口瞳外周を見込む半角であり $\sin\theta=NA$ の関係がある.

図 3.9 で示すように NA が 0.60 程度であればベクトル理論とスカラー理論の差は分からないレベルであるが, 図 3.7 の強度プロファイルが示すように NA が 0.95 まで大きくなるとベクトルとスカラー理論とでは強度分布が異なってくる.

(3-16)式においてデフォーカス項を瞳関数 \mathbf{G}' に繰り込んだの同様に, 波面収差についても瞳関数 \mathbf{G}' に収差の表現手段の 1 つであるゼルニケ係数の関数として繰り込んで取り扱うことが可能である[6]. 図 3.10 にコマ収差 ($Z7=0.1\lambda$) を与えた場合の PSF の強度分布を示す. 同条件で無収差の場合の図 3.7 と比べ, xz 面の強度分布が非対称な分布となっていることが分かる. なお, 本論文でのシミュレーションは特に断りがない限り無収差とした.

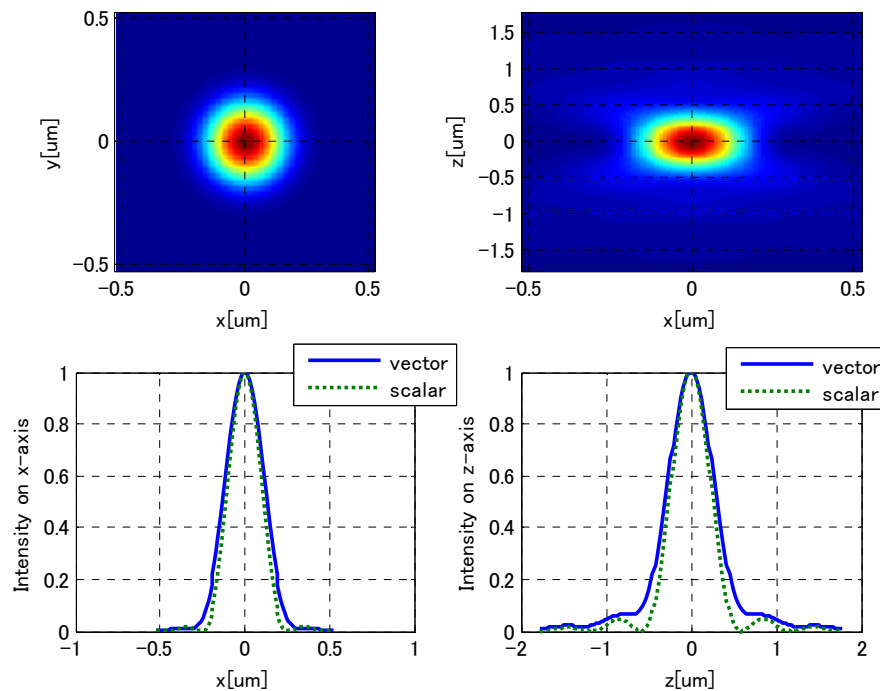


図 3.7 PSF の強度分布 (NA0.95 $\lambda=405\text{nm}$ 円偏光 無収差)

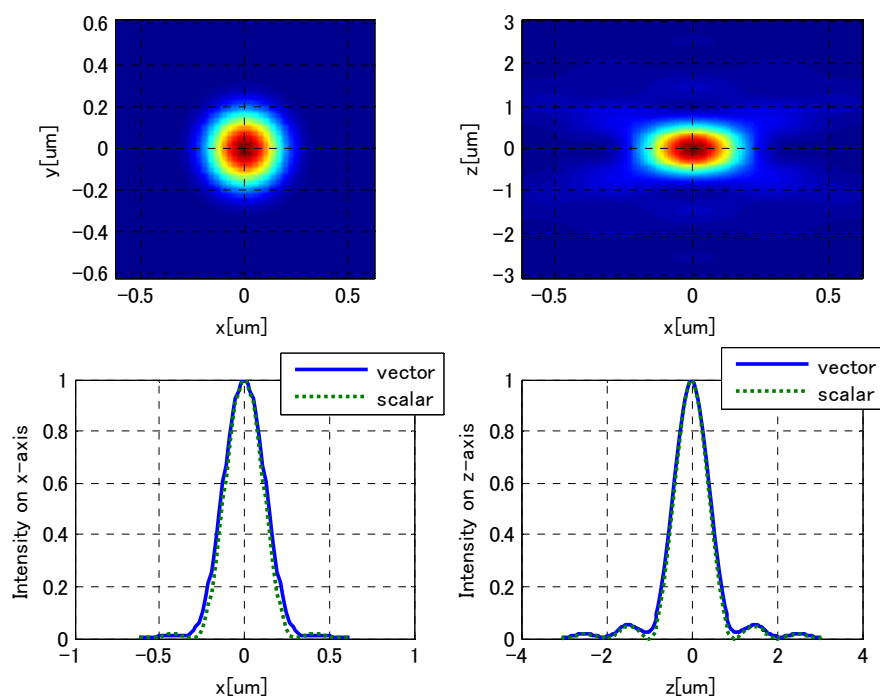


図 3.8 PSF の強度分布 (NA0.80 $\lambda=405\text{nm}$ 円偏光 無収差)

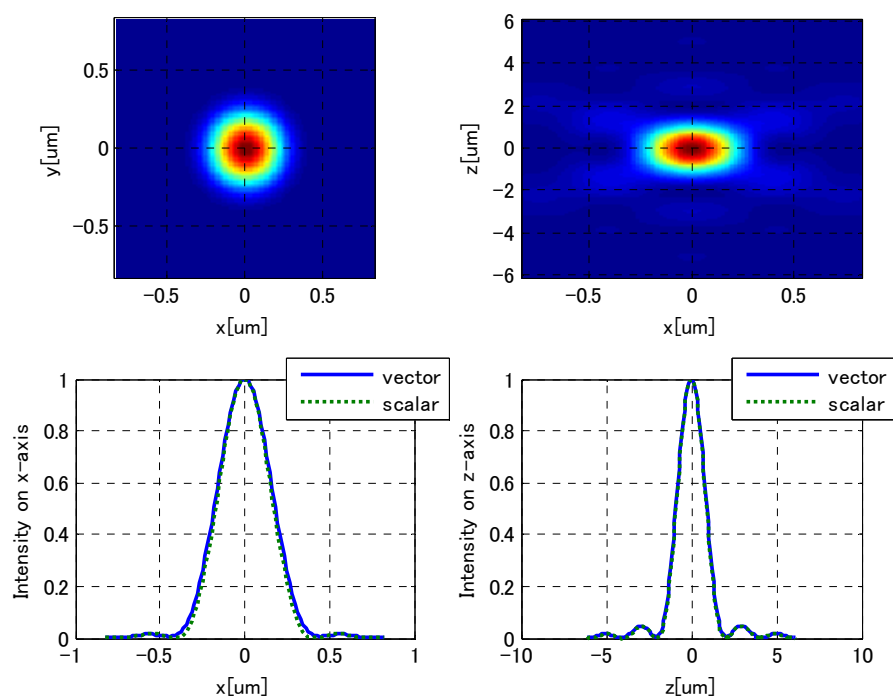


図 3.9 PSF の強度分布 (NA0.60 $\lambda=405\text{nm}$ 円偏光 無収差)

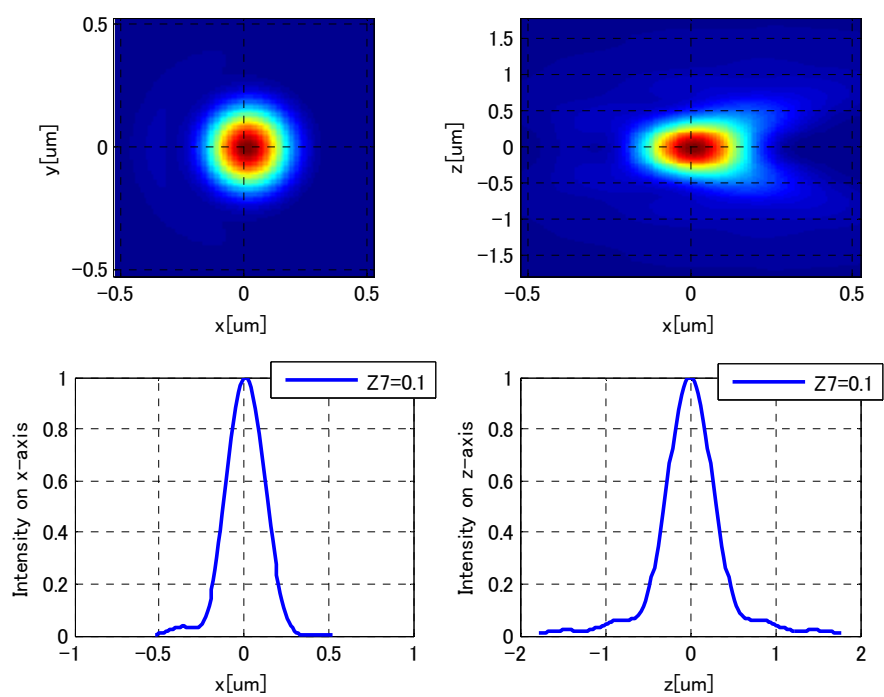


図 3.10 収差 ($Z7=0.1$) がある場合の PSF の強度分布 (NA0.95 $\lambda=405\text{nm}$ 円偏光)

3.5 FDTD 法による散乱光分布の計算

FDTD 法は全ての単位セルについて時系列でマクスウエル方程式を解き、解析対象空間の電磁場分布を求める演算手法である。以下にその方法を示す。

3.5.1 マクスウエル方程式と差分化[5]

マクスウエル方程式は式(3-23), 式(3-24)で表される。

$$\nabla \times H = \epsilon \frac{\partial E}{\partial t} + \sigma E \quad (3-23)$$

$$\nabla \times E = -\mu \frac{\partial H}{\partial t} \quad (3-24)$$

E , H は電場, 磁場, ϵ , σ , μ は誘電率, 導電率, 透磁率である。FDTD 法では式(3-23), (3-24)の全ての微分を式(3-25)で示すような中心差分で置き換え, 時間領域で解が収束するまで演算を行う。

$$\frac{\partial f(t)}{\partial t} \rightarrow \frac{f\left(t + \frac{\Delta t}{2}\right) - f\left(t - \frac{\Delta t}{2}\right)}{\frac{\Delta t}{2}} \quad (3-25)$$

式(3-23),(3-24)を式(3-25)に従って差分化すると, 電磁場 6 成分はそれぞれ次式で与えられる。

$$\begin{aligned} E_x^{n+1}\left(i + \frac{1}{2}, j, k\right) &= \frac{1 - \sigma\left(i + \frac{1}{2}, j, k\right) \Delta t / 2\epsilon\left(i + \frac{1}{2}, j, k\right)}{1 + \sigma\left(i + \frac{1}{2}, j, k\right) \Delta t / 2\epsilon\left(i + \frac{1}{2}, j, k\right)} E_x^n\left(i + \frac{1}{2}, j, k\right) \\ &+ \frac{1}{\epsilon\left(i + \frac{1}{2}, j, k\right) / \Delta t + \sigma\left(i + \frac{1}{2}, j, k\right) / 2} \\ &\times \left[\frac{H_z^{n+\frac{1}{2}}\left(i + \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}, k\right) - H_z^{n+\frac{1}{2}}\left(i + \frac{1}{2}, j - \frac{1}{2}, k\right)}{\Delta y} \right. \\ &\left. - \frac{H_y^{n+\frac{1}{2}}\left(i + \frac{1}{2}, j, k + \frac{1}{2}\right) - H_y^{n+\frac{1}{2}}\left(i + \frac{1}{2}, j, k - \frac{1}{2}\right)}{\Delta z} \right] \end{aligned} \quad (3-26)$$

$$\begin{aligned}
E_y^{n+1}\left(i, j + \frac{1}{2}, k\right) &= \frac{1 - \sigma\left(i, j + \frac{1}{2}, k\right) \Delta t / 2 \epsilon\left(i, j + \frac{1}{2}, k\right)}{1 + \sigma\left(i, j + \frac{1}{2}, k\right) \Delta t / 2 \epsilon\left(i, j + \frac{1}{2}, k\right)} E_y^n\left(i, j + \frac{1}{2}, k\right) \\
&+ \frac{1}{\epsilon\left(i, j + \frac{1}{2}, k\right) / \Delta t + \sigma\left(i, j + \frac{1}{2}, k\right) / 2} \\
&\times \left[\frac{H_x^{n+\frac{1}{2}}\left(i, j + \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2}\right) - H_x^{n+\frac{1}{2}}\left(i, j + \frac{1}{2}, k - \frac{1}{2}\right)}{\Delta z} \right. \\
&\left. - \frac{H_z^{n+\frac{1}{2}}\left(i + \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}, k\right) - H_z^{n+\frac{1}{2}}\left(i - \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}, k\right)}{\Delta x} \right]
\end{aligned} \tag{3-27}$$

$$\begin{aligned}
E_z^{n+1}\left(i, j, k + \frac{1}{2}\right) &= \frac{1 - \sigma\left(i, j, k + \frac{1}{2}\right) \Delta t / 2 \epsilon\left(i, j, k + \frac{1}{2}\right)}{1 + \sigma\left(i, j, k + \frac{1}{2}\right) \Delta t / 2 \epsilon\left(i, j, k + \frac{1}{2}\right)} E_z^n\left(i, j, k + \frac{1}{2}\right) \\
&+ \frac{1}{\epsilon\left(i, j, k + \frac{1}{2}\right) / \Delta t + \sigma\left(i, j, k + \frac{1}{2}\right) / 2} \\
&\times \left[\frac{H_y^{n+\frac{1}{2}}\left(i + \frac{1}{2}, j, k + \frac{1}{2}\right) - H_y^{n+\frac{1}{2}}\left(i - \frac{1}{2}, j, k + \frac{1}{2}\right)}{\Delta x} \right. \\
&\left. - \frac{H_x^{n+\frac{1}{2}}\left(i, j + \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2}\right) - H_x^{n+\frac{1}{2}}\left(i, j - \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2}\right)}{\Delta y} \right]
\end{aligned} \tag{3-28}$$

$$\begin{aligned}
H_x^{n+\frac{1}{2}}\left(i, j + \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2}\right) &= H_x^{n-\frac{1}{2}}\left(i, j + \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2}\right) - \frac{\Delta t}{\mu\left(i, j + \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2}\right)} \\
&\times \left[\frac{E_z^n\left(i, j + 1, k + \frac{1}{2}\right) - E_z^n\left(i, j, k + \frac{1}{2}\right)}{\Delta y} \right. \\
&\left. - \frac{E_y^n\left(i, j + \frac{1}{2}, k + 1\right) - E_y^n\left(i, j + \frac{1}{2}, k\right)}{\Delta z} \right]
\end{aligned} \tag{3-29}$$

$$\begin{aligned}
H_y^{n+\frac{1}{2}}\left(i+\frac{1}{2}, j, k+\frac{1}{2}\right) &= H_y^{n-\frac{1}{2}}\left(i+\frac{1}{2}, j, k+\frac{1}{2}\right) - \frac{\Delta t}{\mu\left(i+\frac{1}{2}, j, k+\frac{1}{2}\right)} \\
&\times \left[\frac{E_x^n\left(i+\frac{1}{2}, j, k+\frac{1}{2}\right) - E_x^n\left(i+\frac{1}{2}, j, k\right)}{\Delta z} \right. \\
&\left. - \frac{E_z^n\left(i+1, j, k+\frac{1}{2}\right) - E_z^n\left(i, j, k+\frac{1}{2}\right)}{\Delta x} \right]
\end{aligned} \tag{3-30}$$

$$\begin{aligned}
H_z^{n+\frac{1}{2}}\left(i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}, k\right) &= H_z^{n-\frac{1}{2}}\left(i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}, k\right) - \frac{\Delta t}{\mu\left(i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}, k\right)} \\
&\times \left[\frac{E_y^n\left(i+1, j+\frac{1}{2}, k\right) - E_y^n\left(i, j+\frac{1}{2}, k\right)}{\Delta x} \right. \\
&\left. - \frac{E_x^n\left(i+\frac{1}{2}, j+1, k\right) - E_x^n\left(i+\frac{1}{2}, j, k\right)}{\Delta y} \right]
\end{aligned} \tag{3-31}$$

一例として式(3-26)を解釈すると、「時刻 $(n+1)\Delta t$ におけるある位置の電場成分 E_x は同じ位置の時刻 $n\Delta t$ における電場 E_x とその位置を取り囲む最隣接位置での時刻 $(n+1/2)\Delta t$ における磁場 H_y, H_z のみによって決定される」となる．式(3-27)～(3-31)についても同様の解釈ができる．ここで電場と磁場はそれぞれ時間軸で $\Delta t/2$ だけシフトして関係付けられているため，初期電場を与えた後は，電場と磁場の計算を交互に順次行うことで時間領域での電磁場解析が進行する．

3.5.2 離散時間 Δt の設定[5]

離散時間 Δt は単位セルの空間 $\Delta x \times \Delta y \times \Delta z$ を電磁波が伝播する時間よりも小さくなるように設定する必要がある．この条件は Courant の条件と呼ばれ式(3-32)で与えられる．

$$\Delta t \leq \frac{1}{v \sqrt{\left(\frac{1}{\Delta x}\right)^2 + \left(\frac{1}{\Delta y}\right)^2 + \left(\frac{1}{\Delta z}\right)^2}} \quad (3-32)$$

ここで v は解析空間内を伝わる最も速い位相速度である。

3.5.3 境界条件[4]

第 3.3 節で述べたように本シミュレーションでは集光スポット照射位置近傍の一部空間しか FDTD 演算空間を設定していないため、この空間の外側へ向かって伝播しようとする光が、そのモデリングの都合で存在する架空の境界面で反射することのないような境界条件が必要である。本研究では Berenger の提案した PML 層(Perfectly Matched Layer)とよばれる吸収層[8]を用いた。以下にその詳細を述べる。

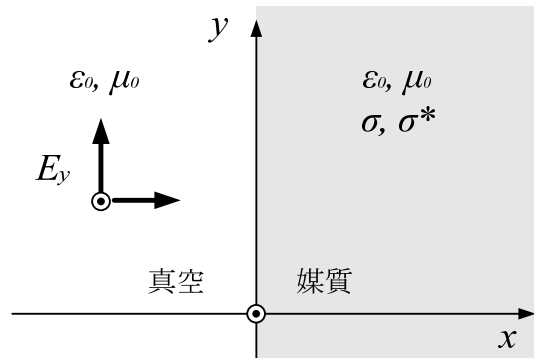


図 3.11 磁気損失を持つ媒質への平面波の垂直入射

図 3.11 に示すように真空中から平面波が境界面に垂直に入射する場合、真空中の波動インピーダンス Z_0 、媒質中の波動インピーダンス Z はそれぞれ次式となる。

$$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \quad (3-33)$$

$$Z = \sqrt{\frac{\mu_0 + \frac{\sigma^*}{j\omega}}{\varepsilon_0 + \frac{\sigma}{j\omega}}} = \sqrt{\frac{\mu_0 \left(1 + \frac{1}{j\omega} \frac{\sigma^*}{\mu_0}\right)}{\varepsilon_0 \left(1 + \frac{1}{j\omega} \frac{\sigma}{\varepsilon_0}\right)}} \quad (3-34)$$

PML 層ではこれら2つのインピーダンスが等しくなるように σ , σ^* を決める. $Z_0=Z$ となるインピーダンスマッチング条件は

$$\frac{\sigma}{\varepsilon_0} = \frac{\sigma^*}{\mu_0} \quad (3-35)$$

である. ここで σ は導電率(electric conductivity), σ^* は導磁率(magnetic conductivity)である.

ここまでは図 3.11 のように境界面に対して垂直入射する場合を考えたが, 斜めに入射する場合は式(3-35)が満たされても境界面での反射はゼロにはならない. そこで PML 層では入射波のベクトル成分ごとに異なる導電率と導磁率を持つという非物理的な媒質 (人工的な仮想媒質) を考えるのが特徴である. そして, この層内を通過することによって急激に電磁波が減衰するように各層ごとにインピーダンスマッチング条件を保ちながら導電率と導磁率を順次変化させる.

いま, ベクトル成分ごとの導電率と導磁率をそれぞれ σ_x , σ_y , σ_z , σ_x^* , σ_y^* , σ_z^* とすると, 図 3.12 で示したような FDTD 演算空間の外側に設けた PML 層の導電率と導磁率は, 以下で与えられる.

$$\sigma_x = \begin{cases} \sigma_{max} \left[\frac{L\Delta x - x}{L\Delta x} \right]^M & : x < L\Delta x \\ 0 & : L\Delta x < x < (NX-L-1)\Delta x \\ \sigma_{max} \left[\frac{x - (NX-L-1)\Delta x}{L\Delta x} \right]^M & : x > (NX-L-1)\Delta x \end{cases} \quad (3-36)$$

$$\sigma_y = \begin{cases} \sigma_{max} \left[\frac{L\Delta y - y}{L\Delta y} \right]^M & : y < L\Delta y \\ 0 & : L\Delta y < y < (NY-L-1)\Delta y \\ \sigma_{max} \left[\frac{y - (NY-L-1)\Delta y}{L\Delta y} \right]^M & : y > (NY-L-1)\Delta y \end{cases} \quad (3-37)$$

$$\sigma_z = \begin{cases} \sigma_{max} \left[\frac{L\Delta z - z}{L\Delta z} \right]^M & : z < L\Delta z \\ 0 & : L\Delta z < z < (NZ-L-1)\Delta z \\ \sigma_{max} \left[\frac{z - (NZ-L-1)\Delta z}{L\Delta z} \right]^M & : z > (NZ-L-1)\Delta z \end{cases} \quad (3-38)$$

$$\sigma_x^* = \frac{\mu_0}{\varepsilon_0} \sigma_x \quad (3-39)$$

$$\sigma_y^* = \frac{\mu_0}{\varepsilon_0} \sigma_y \quad (3-40)$$

$$\sigma_z^* = \frac{\mu_0}{\varepsilon_0} \sigma_z \quad (3-41)$$

$$\sigma_{maz} = -\frac{(M+1)\varepsilon_0 c}{2L\Delta x} \ln|R(0)| \quad (3-42)$$

ここで L は PML 層の層数, M は導電率の分布を与える次数, σ_{max} は PML 層の外壁での導電率, $R(\phi)$ は入射角 ϕ の場合の反射係数である. 本研究においては $L=16$, $M=3$, $\ln|R(0)| = -150dB$ とした.

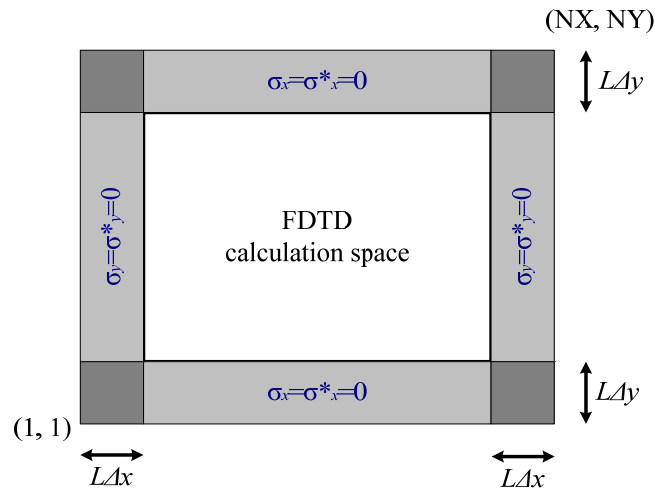


図 3.12 PML 吸収境界層の構造

PML 層は非物理的な媒質であるから PML 層内では式(3-23),(3-24)のようなマクスウェル方程式はそのままでは適用できない. そのため, この層内では電磁場を式(3-43),(3-44)のよう

に成分に分け，式(3-45a)～(3-45f)の 12 個の方程式を差分化して解く．

$$\begin{cases} E_x = E_{xy} + E_{xz} \\ E_y = E_{yx} + E_{yz} \\ E_z = E_{zx} + E_{zy} \end{cases} \quad (3-43)$$

$$\begin{cases} H_x = H_{xy} + H_{xz} \\ H_y = H_{yx} + H_{yz} \\ H_z = H_{zx} + H_{zy} \end{cases} \quad (3-44)$$

$$\begin{cases} \varepsilon_0 \frac{\partial E_{xy}}{\partial t} + \sigma_y E_{xy} = \frac{\partial H_z}{\partial y} \\ \varepsilon_0 \frac{\partial E_{xz}}{\partial t} + \sigma_z E_{xz} = -\frac{\partial H_y}{\partial z} \end{cases} \quad (3-45a)$$

$$\begin{cases} \varepsilon_0 \frac{\partial E_{yz}}{\partial t} + \sigma_z E_{yz} = \frac{\partial H_x}{\partial z} \\ \varepsilon_0 \frac{\partial E_{yx}}{\partial t} + \sigma_x E_{yx} = -\frac{\partial H_z}{\partial x} \end{cases} \quad (3-45b)$$

$$\begin{cases} \varepsilon_0 \frac{\partial E_{zx}}{\partial t} + \sigma_x E_{zx} = \frac{\partial H_y}{\partial x} \\ \varepsilon_0 \frac{\partial E_{zy}}{\partial t} + \sigma_y E_{zy} = -\frac{\partial H_x}{\partial y} \end{cases} \quad (3-45c)$$

$$\begin{cases} \mu_0 \frac{\partial H_{xy}}{\partial t} + \sigma_y^* H_{xy} = -\frac{\partial E_z}{\partial y} \\ \mu_0 \frac{\partial H_{xz}}{\partial t} + \sigma_z^* H_{xz} = \frac{\partial E_y}{\partial z} \end{cases} \quad (3-45d)$$

$$\begin{cases} \mu_0 \frac{\partial H_{yz}}{\partial t} + \sigma_z^* H_{yz} = -\frac{\partial E_x}{\partial z} \\ \mu_0 \frac{\partial H_{yx}}{\partial t} + \sigma_x^* H_{yx} = \frac{\partial E_z}{\partial x} \end{cases} \quad (3-45e)$$

$$\begin{cases} \mu_0 \frac{\partial H_{zx}}{\partial t} + \sigma_x^* H_{zx} = -\frac{\partial E_y}{\partial x} \\ \mu_0 \frac{\partial H_{zy}}{\partial t} + \sigma_y^* H_{zy} = \frac{\partial E_x}{\partial y} \end{cases} \quad (3-45f)$$

3.6 光検出強度の計算

本シミュレーションで行った散乱光の検出強度の計算のための Fresnel-Kirchhoff 回折積分では PSF の算出同様に光の伝播方向の偏光も考慮した。この場合、回折積分は FDTD による散乱電場分布と PSF の内積を取ることと等価である。但しこの場合はピンホール径として面積を持たない 1 点（つまり無限小）として設定したことになる。一般的な走査型レーザ顕微鏡で用いるピンホール径は光の回折限界（光にとっては点とみなせる大きさ）程度のため[3], 本検討においては面積を持たない空間上の 1 点を通過する光のエネルギーを光検出強度とした。

3.7 表面位置の検出

図 3.13 に示すように空間的に広がりを持つ光検出強度分布のある位置 (x,y) における検出強度の変化曲線 $I_{x,y}(z)$ に対して最小二乗法によるガウシアン曲線近似を行い、その最大強度を与える Z 座標 $Z_{\max}(x,y)$ を推定してこれを標本の表面位置とした。なお、ガウシアン曲線近似は強度の最大値を与えるシミュレーションポイントを中心とした 11 点（ピーク波高の約 90%以上の高さ）のデータを使ってフィッティングした。

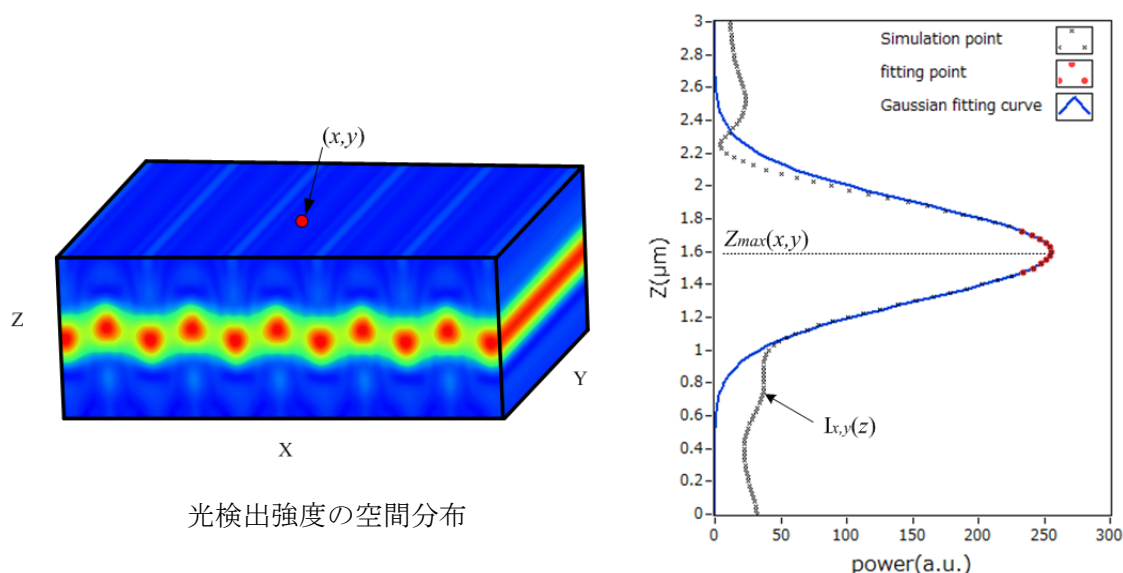


図 3.13 表面位置の決定方法

3.8 シミュレーション諸条件

各種シミュレーション条件は第 3.9 節で使用する走査型レーザ顕微鏡の実機と極力同一の条件となるように設定した。表 3.1 にシミュレーション条件を、表 3.2 にシミュレーションに用いたハード/ソフトウェア環境を示す。

表 3.1 シミュレーション条件

光源波長 (λ)	405nm
偏光方向	円偏光
対物レンズの開口数(NA)	0.95 or 0.80 or 0.60
ピンホール直径	無限小
FDTD 演算空間サイズ ($x \times y \times z$)	$1.3 \times 1.3 \times 2.3 \mu\text{m}$ or $2.0 \times 2.0 \times 2.4 \mu\text{m}$
単位セルサイズ ($\Delta x \times \Delta y \times \Delta z$)	$13.5 \times 13.5 \times 15 \text{nm}$ or $20 \times 20 \times 20 \text{nm}$
FDTD 演算の離散時間 (Δt)	$1.34 \times 10^{-17} \text{s}$ or $1.93 \times 10^{-17} \text{s}$
標本材質と複素屈折率	シリコン 5.420-0.329j [9]

表 3.2 シミュレーション環境

OS	Windows Vista™ Business SP2 64bit
CPU	Intel(R) Core(TM) i7 @ 2.67GHz
Memory(RAM)	6GB
GPU	NVIDIA Tesla C1060 (2set)
	Number of processor core:240
	Processor core clock: 1.296GHz
	Memory 4GB
プログラミング言語	Processing performance: 933GFLOPs/s
	CUDA Ver4.2 (FDTD)
	Matlab R2011b (PSF calculation)
	Labview2012 (Data analysis)

3.9 実測との比較によるシミュレーション結果の妥当性検証[10]

LSM の実機（オリンパス製 OLS4000, $NA=0.95$, $\lambda=405\text{nm}$ ）での実測結果とシミュレーション結果を比較した．厳密で対等な比較を行うために，実機で使用した対物レンズの波面収差（トワイマングリーン干渉計にて実測）を，シミュレーションでの集光スポットの強度分布と回折積分の演算にも用いた．解析対象面として約 80nm の深さを持つ放射状の溝 [11]を用いた．図 3.14 に比較結果を示す．同図(a)は光学式測定機よりも微細な形状の測定が可能と考えられる原子間力顕微鏡 AFM（オリンパス製 OLS3500, OMCL-AC200TS ）による測定結果， (b)は LSM 実機による測定結果， (c)は (a)の形状を入力モデルとした場合のシミュレーション結果である． (b)と(c)を比較すると，実際の解析対象面には存在しない狭ピッチ部での高さの盛り上がり，つまり異常値が見られる． (d)はこれらの異常値を含む部分の断面曲線を同一グラフ上にプロットしたものであるが，異常値の出現傾向が実測値とシミュレーション結果とで良く一致している． 異常値が溝の方向に対してわずかに左右非対称に出現する理由は光学系の非対称な波面収差成分の影響と思われる．

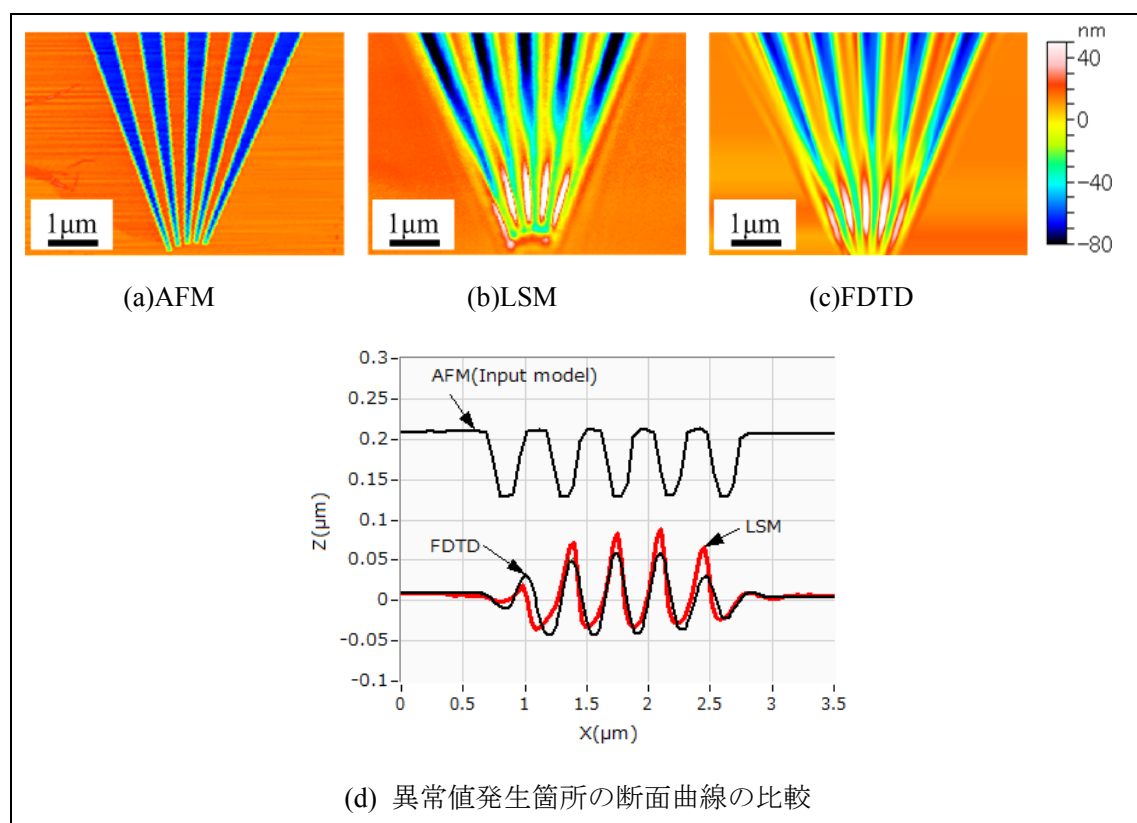


図 3.14 矩形溝標本の実測とシミュレーションの比較

図 3.15 に 2 つ目の検証結果を示す．先に示した図 3.14 では矩形断面をもつ標本を対象としたが，図 3.15 ではランダム形状を持つ標本を用いた．ここでも図 3.14 の場合同様に AFM による測定結果(a)を入力モデルとしたシミュレーション結果(c)と LSM による実測結果(b)を比較した．それぞれの測定データ中に破線で示した部分の断面曲線を比較した(d)を見ると，シミュレーションと LSM の断面には AFM には存在しない急激な高さ変化($x=3\mu\text{m}$ 付近)が見られる．この場所はこの標本の中で最も急な局所傾斜であることからこの急激な高さ変化は異常値となる直前の状態であると思われる．

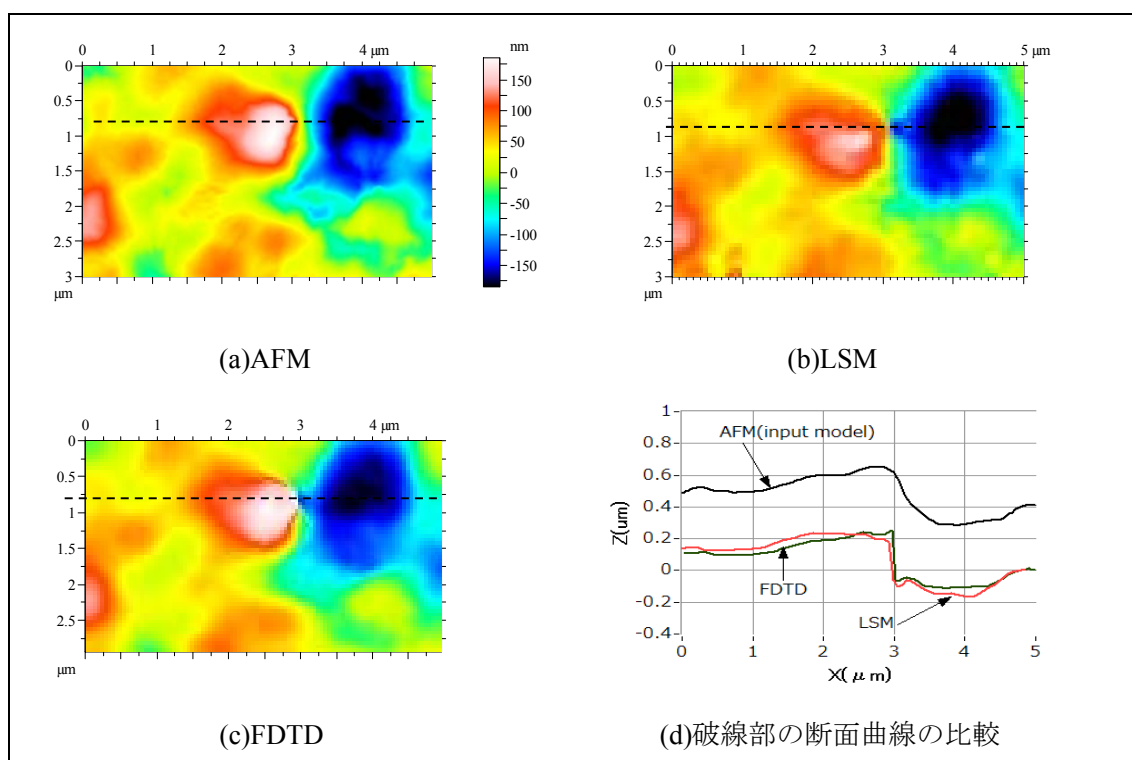


図 3.15 ランダム粗さ標本の実測とシミュレーションの比較

標本サイズ : $5\mu\text{m}(x) \times 3\mu\text{m}(y) \times 1.2\mu\text{m}(z)$

光の照射ポイント数 : $99(x) \times 59(y) \times 13(z) = 75933$ 箇所

演算時間 : 約 10 日 (=308 箇所/hour)

参考までシミュレーションに要する時間について触れておく．図 3.15 の場合には，標本モデルサイズ $5\mu\text{m}(x) \times 3\mu\text{m}(y) \times 1.2\mu\text{m}(z)$ の空間上の約 76000 箇所にレーザ光の照射を行い，それら各々に対して FDTD 演算とベクトル回折積分を行った．表 3.2 に示した環境を用いた場合，このシミュレーション完了までに約 10 日を要した．

図 3.14 と図 3.15 で示したように，本研究で開発したシミュレーション手法により予測される測定結果は異常値を含む実際の測定結果と良く一致することから，本シミュレーション方法には妥当性があると判断できる．

3.10 まとめ

1. 強散乱標本に対する走査型レーザ顕微鏡の応答挙動を解析するために電磁場解析法の 1 つである FDTD 法を用いたベクトルシミュレーション手法を開発した．
2. FDTD 法の基本原理と，偏光のベクトル成分も考慮したベクトル回折理論について述べ，本シミュレーション手法の詳細について説明した．
3. シミュレーション結果は，走査型レーザ顕微鏡の実測結果に見られる異常値を含む測定結果と良い一致を示すことを確認し，本シミュレーション手法による結果の妥当性を確認することができた．

参考文献

- [1] K.S.Kuntz, R.J.Luebbers, *The finite difference time domain methods for electromagnetics*, CRC press (1993)
- [2] Richard Leach (Editor), *Optical measurement of surface topography*, Springer (2011)
- [3] Timothy R. Corle, Gordon S. Kino, *Confocal scanning optical microscopy and related imaging systems*, Academic Press (1996)
- [4] 宇野 亨, FDTD 法による電磁界およびアンテナ解析, コロナ社 (1998)
- [5] 光学技術者のための電磁場解析入門, オプトロニクス社, (2010)
- [6] 渋谷真人, 大木裕史, 回折と結像の光学, 朝倉書店 (2005)pp.112-143
- [7] 鶴田匡夫, 第 5・光の鉛筆ー光技術者のための応用光学ー, アドコムメディア, (2000)pp.189-205
- [8] J.P.Berenger , A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves, J. Comput. Phys. 114(1994)pp. 185-200
- [9] Edward D Palik, *Handbook of optical constants of solids*, Academic press (1985)
- [10] A Fujii, S Hayashi, S Fujii, K Yanagi, Analytical study on optically measured surface profiles of referential geometry using a FDTD method, Surface Topography: Metrology and Properties 2 (2014) 014004
- [11] A Fujii, H Suzuki, and K Yanagi, A study on response properties of surface texture measuring instruments in terms of surface wavelength, Proceedings of ASPE Summer Topical Meeting on Precision Interferometric Metrology, 49 (2010) pp.91-96

第4章 標本の基本形状に対する応答特性の数値解析

本章では第3章で開発したシミュレーション手法を用いて、傾斜平面、正弦波状断面、矩形波状断面形状に対する走査型レーザ顕微鏡の応答特性を解析し、これら解析対象面での散乱光の分布から、異常値の発生メカニズムを考察すると共に、光学式表面性状測定機を対象とした校正用あるいは検定用の測定標準面（標準片）の設計指針について考察する。

4.1 集光スポット内部の局所形状の分類

光学式測定機の応答特性を考える場合、集光スポット（光学プローブ）の範囲内の局所形状が応答挙動を決定する。局所的な形状要素は、平面、湾曲面、エッジの3種の基本形状に分類して考えた。本研究では図4.1に示すように平面としては傾斜平面、湾曲面としては正弦波状断面、エッジとしては矩形波状断面および三角波状断面とし、それらの形状に対する光学式測定機の応答特性を解析した。なお、以降のシミュレーションでは光学系は無収差とした。

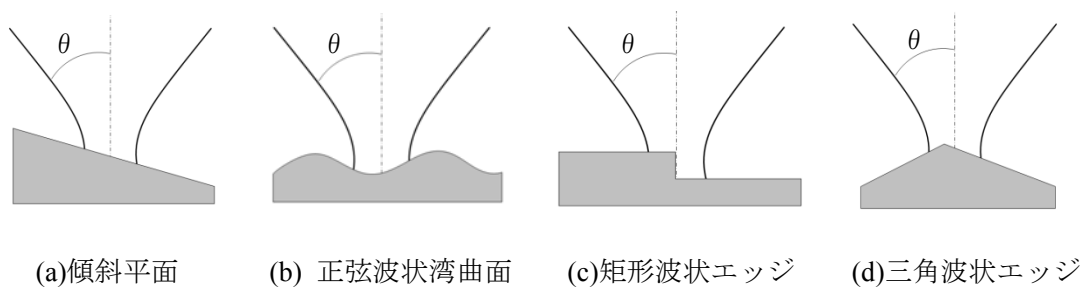


図4.1 集光スポット範囲内の局所形状の分類

4.2 傾斜平面に対する応答[1]

図4.2は傾斜平面での正反射光の検出を幾何光学モデルで示したものである。平面の傾斜角度 α が対物レンズのNAの見込み半角 θ と等しくなる角度が幾何光学で考えた場合の理論的な最大許容傾斜角[2]である。表4.1に対物レンズのNAと理論最大許容傾斜角の関係をまとめた。

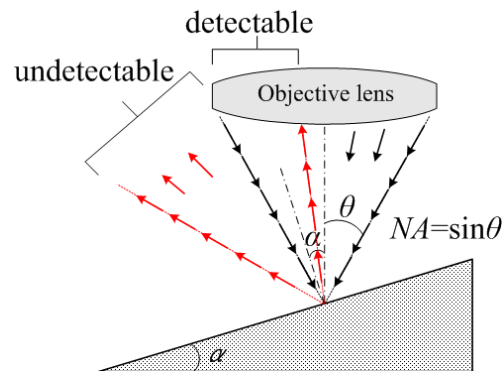


図 4.2 反射光の検出に関する幾何光学モデル

表 4.1 幾何光学モデルから導かれる最大許容傾斜角の理論値

NA	Maximum slope angle (degrees)
0.15	8.5
0.30	17.5
0.60	37
0.80	53
0.95	72

図 4.3 は NA=0.80 の対物レンズを用いた場合の傾斜平面に対する測定機の応答のシミュレーション結果である。傾斜角度は(a)15.5 度と(b)29 度であり，共に表 4.1 で示した理論限界値(=53 度)よりも小さく設定した。上側の画像が光検出強度分布の XZ 断面で，下側が断面の輪郭を表している。図 4.3 (a)，(b)どちらの場合の応答もシミュレーションへの入力波形形状どおりの輪郭が得られていることから，傾斜平面に対する測定機の応答特性は図 4.2 で示したような単純な幾何光学モデルに従うと考えられる。ただし，急傾斜になるほど検出強度が小さくなることは自明なため，実測定場面における測定可能な傾斜角は測定機の微弱光の検出能力に依存すると考えられる。

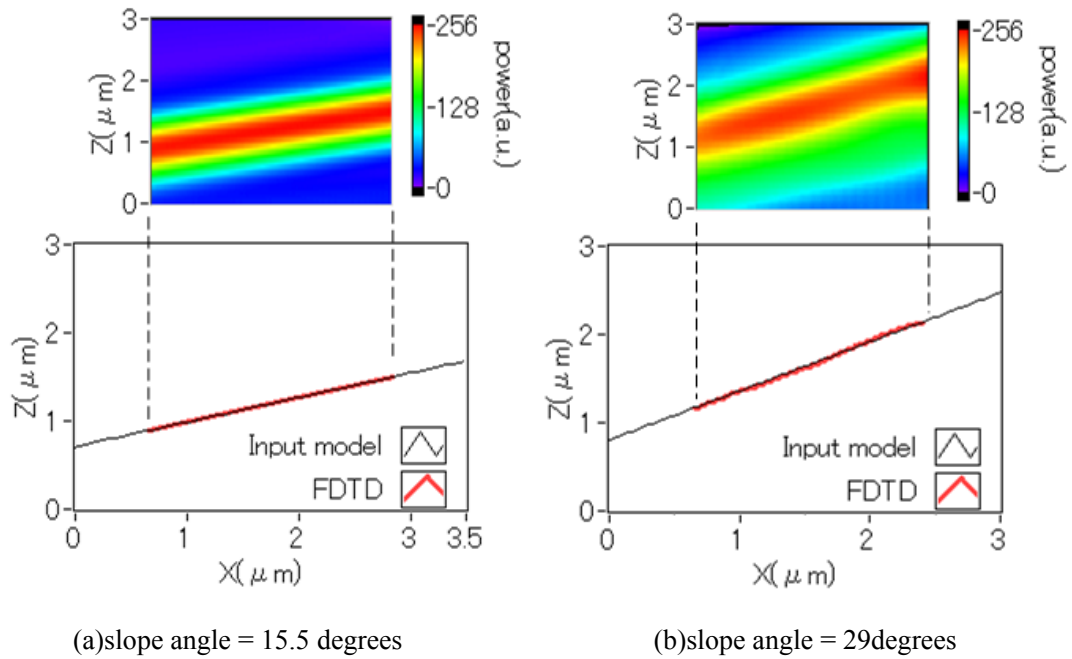


図 4.3 傾斜平面に対する応答 (NA=0.80)

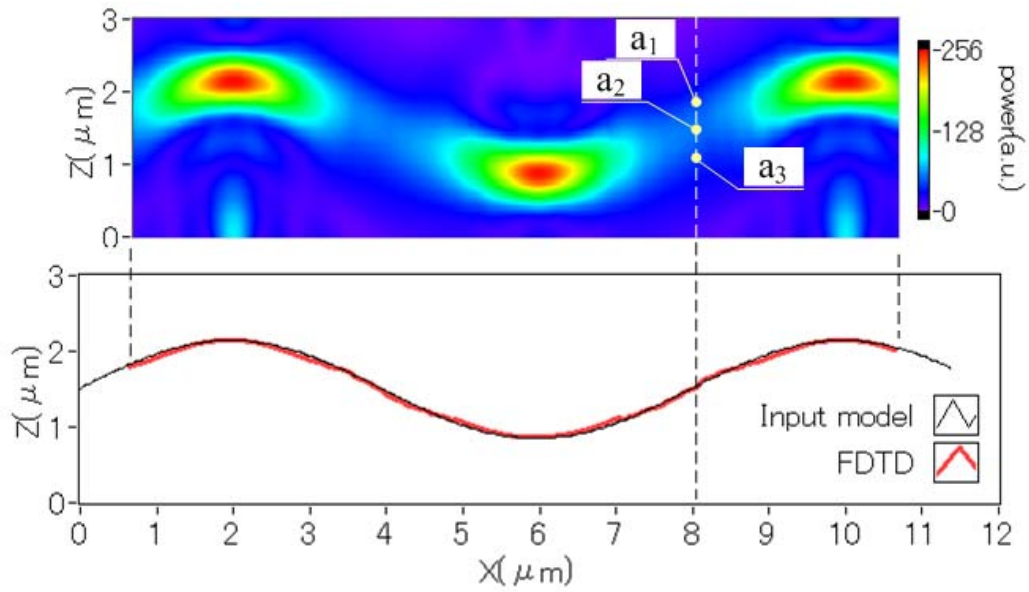
4.3 正弦波状断面に対する応答[1]

光学式測定機では測定対象面の傾斜が測定結果に著しい影響をおよぼす事が経験的に知られているため、正弦波の局所最大傾斜角 α_{max} を 1 つの形状の指標とした．正弦波の空間波長を T ，振幅（深さ）を D とすると，局所最大傾斜角 α_{max} は正弦波形の一次微分の最大値から導かれ式(4-1)となる．

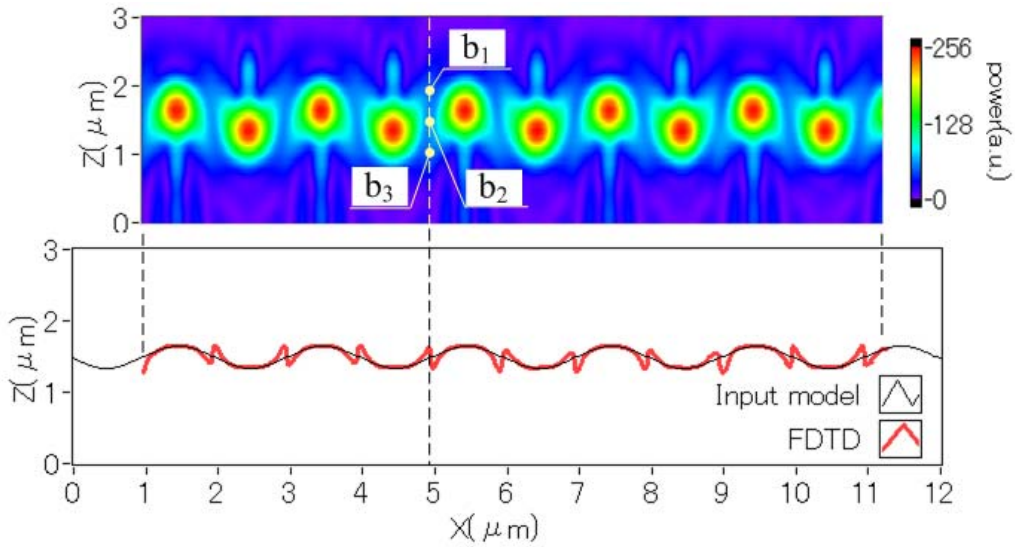
$$\alpha_{max} = \frac{\pi D}{T} \quad (4-1)$$

図 4.4 は最大局所傾斜角 α_{max} を図 4.3(b)で示した傾斜平面の場合と同じ 29 度とした場合の正弦波状断面に対する応答のシミュレーション結果である．空間波長 $T=8\mu\text{m}$ の図 4.4 (a)では入力波形形状どおりの輪郭が得られている．一方，最大局所傾斜角 α_{max} を 29 度に保ったまま空間波長 T を $2\mu\text{m}$ に短くした図 4.4 (b)を見ると最大傾斜角付近で入力波形には存在しない形状，つまり異常値が発生しているのが分かる．図 4.5 は図 4.4 で示した 2 種の波形の最大局所傾斜角（共に 29 度）位置で集光スポットを Z 方向に変化させた際に得られる

光検出強度の変化曲線である． なお，図中 $a_1 \sim a_3$ ， $b_1 \sim b_3$ は図 4.4 の同記号の位置と対応している． 図 4.5(a)では解析対象面の表面位置 a_2 にて光検出強度が最大となっているのに対して，図 4.5(b)では表面位置 b_2 ではなく， b_1 方向にデフォーカスした位置にて光検出強度が最大となっている． これはフォーカス状態で検出強度が最大になるという共焦点顕微鏡法の基本原理に則らない現象であり，これが異常値を引き起こしていると思われる．



(a) $T=8.0\mu\text{m}$, $D=1.3\mu\text{m}$



(b) $T=2.0\mu\text{m}$, $D=0.32\mu\text{m}$

図 4.4 正弦波状断面に対する応答 ($\text{NA}=0.80$, $\alpha_{\text{max}}=29\text{degrees}$)

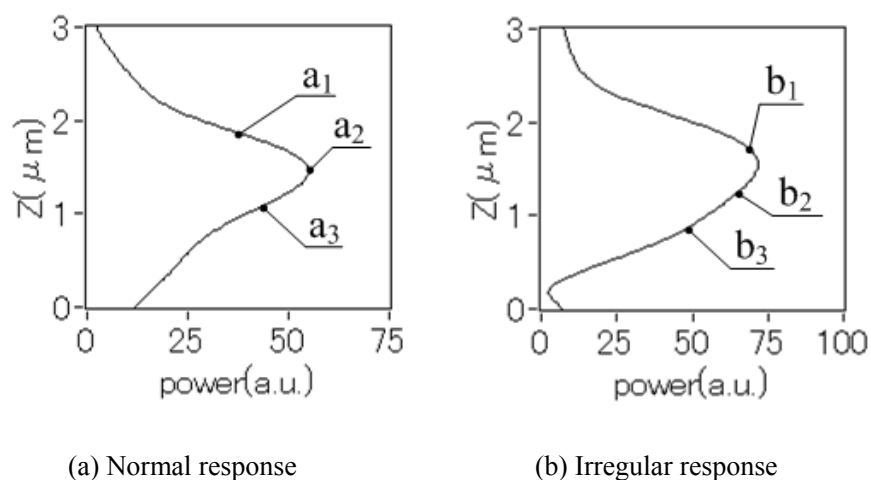


図 4.5 正弦波の最大傾斜位置における光検出強度の変化曲線

なお, 図 4.4(b)で見られるような正弦波の傾斜面で発生する異常値は, 図 4.6 に示す F.Gao ら[3]による垂直走査低コヒーレンス干渉法で正弦波標本を測定した実測データに見られる異常値と出現傾向が酷似していることから, この異常値は LSM だけの固有のものではなく, 他の測定原理の光学式測定機でも発生し得る現象であると思われる。

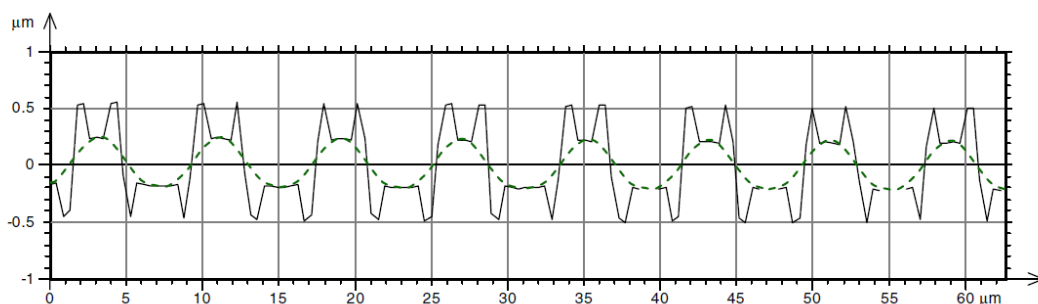


図 4.6 垂直走査低コヒーレンス干渉法による正弦波標本の測定結果の傾斜部に見られる異常値[3]

図 4.7 は図 4.4, 図 4.5 の $a_1 \sim a_3$, $b_1 \sim b_3$ に対応する解析対象面付近での散乱光の強度分布である。図中の点線は解析対象面の母材（シリコン）と空気層の界面を表し、白線は解析対象面に照射した光の集光スポットの光線の輪郭を模式的に表したものである。フォーカス状態の図 4.7(a₂)と(b₂)を比較すると、両者の散乱光の分布は似ているが、異常値の発生原因となったデフォーカス状態の同図 (b₁)は、異常値の原因とはならなかった(a₁)とは分布の傾向が少々異なっている。このような散乱分布の違いが図 4.5(a)と(b)の光検出強度の変化曲線の差異となり、異常値の発生の有無を決定したと考えられる。また、図 4.7 に示した集光スポットの大きさと正弦波形状から分かるように、集光スポット内の局部形状を考えると、2 種の解析対象面の形状の違いは曲率のみである。つまり、図 4.7(a₁)と(b₁)のような散乱光の分布の違いは正弦波の曲率の違いによってもたらされたと考える。

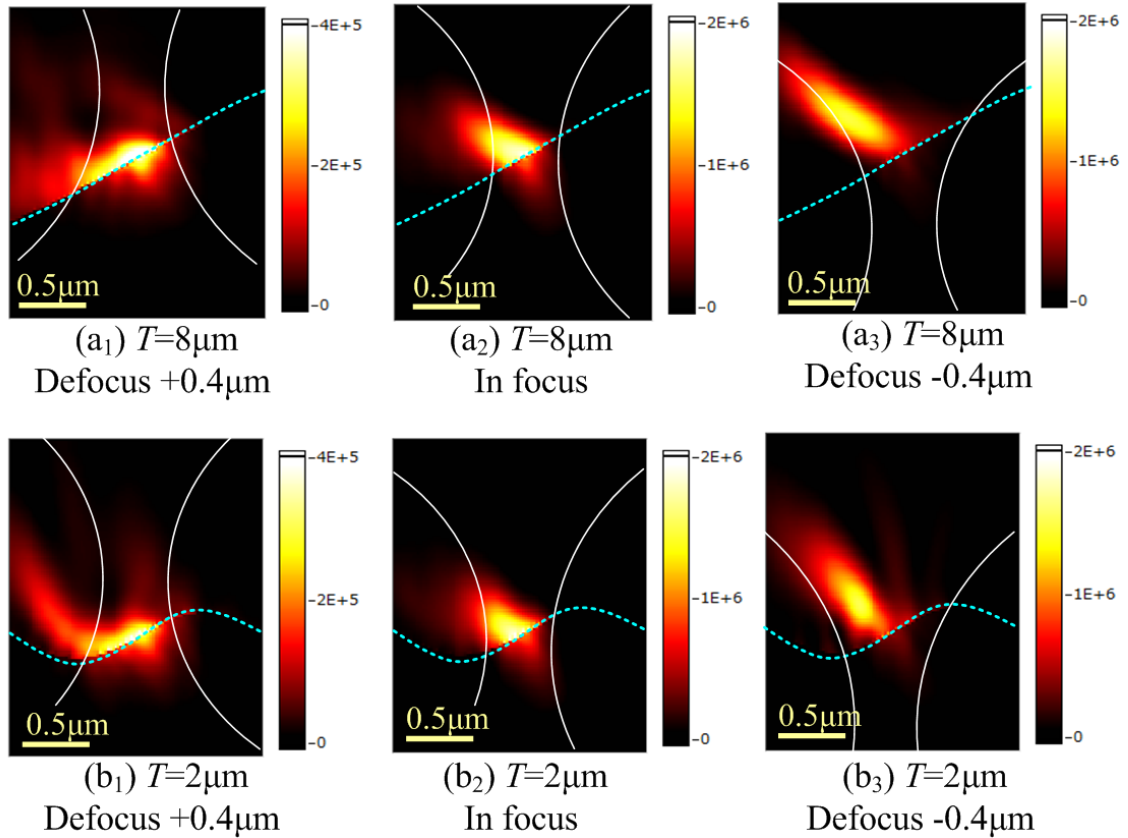
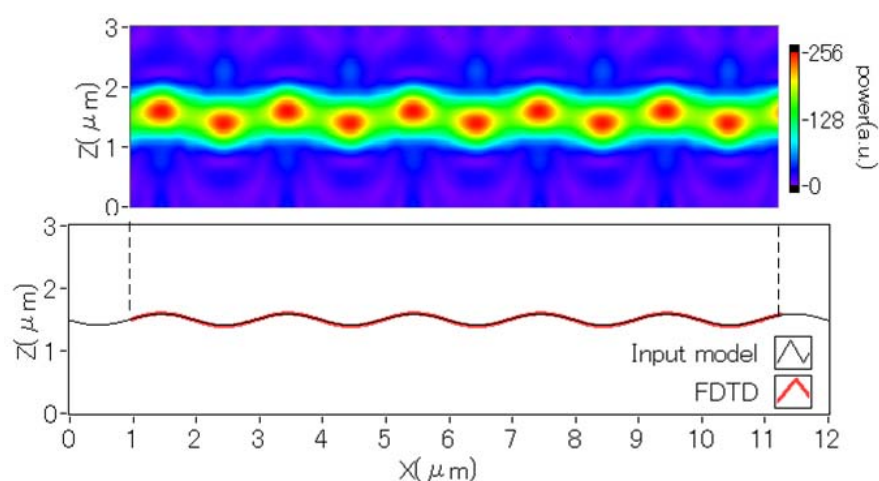
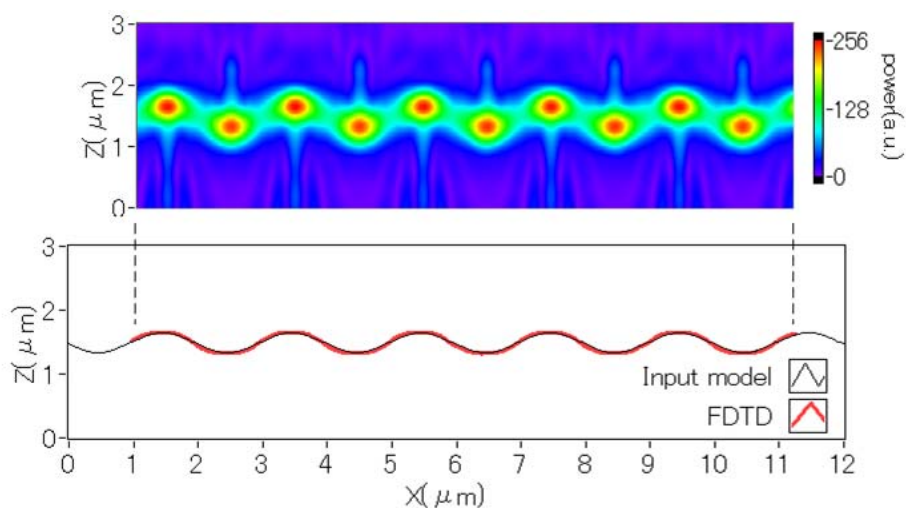


図 4.7 正弦波の最大傾斜位置での散乱光の強度分布 (NA=0.80)

図 4.8(a)は異常値の発生した図 4.4(b) と同じ空間波長 T で最大局所傾斜角 α_{\max} を 15 度小さくした場合で、図 4.8(b)は図 4.4(b) と同じ入力モデルに対し NA を 0.95 に大きくした場合のシミュレーション結果である．どちらの場合でも異常値は消え、入力波形形状どおりの輪郭となった．このように緩傾斜、高 NA といった測定条件下において異常値の発生が抑えられる理由は、本来検出されるべきフォーカス状態の散乱光の検出強度が大きく保てるため、異常値の原因となっていたデフォーカス時の散乱光の検出強度が相対的に小さく抑えられたためと考えられる．



(a) $NA=0.80$, $T=2.0\mu\text{m}$, $D=0.17\mu\text{m}$, $\alpha_{\max}=15\text{degrees}$



(b) $NA=0.95$, $T=2.0\mu\text{m}$, $D=0.32\mu\text{m}$, $\alpha_{\max}=29\text{degrees}$

図 4.8 低傾斜角化(a)および高 NA 化(b)による異常値の低減 ($T=2.0\mu\text{m}$)

4.4 エッジ状断面に対する応答[1][4]

矩形波状と三角波状断面を持つ 2 種のエッジ形状に対する応答を解析した．前者では矩形の振幅 D を，後者では三角形状の頂角を変化させて解析した．

4.4.1 矩形波状断面の場合

図 4.9 は矩形波状断面を持つグレーティングの振幅 D を段階的に変化させた場合のシミュレーション結果である．矩形波の空間波長(ピッチ) T は $NA=0.80$ の光の集光スポットサイズ ($\approx 1.22 \lambda / NA = 0.62 \mu\text{m}$) よりも大きな $2 \mu\text{m}$ とし，1 つの集光スポット内に複数のエッジが入らないようにした．振幅 D は $0.6 \sim 0.04 \mu\text{m}$ の範囲とした．同図のシミュレーションにより得られた輪郭を見ると，矩形波の振幅によってエッジ部の応答は異なる結果となっている．図中 A 部付近ではエッジ部はなだらかな曲線として測定されるが，これとは逆に B 部付近ではスパイク状の過剰応答となっている．このような矩形段差のエッジ部での過剰応答は LSM とは別の測定原理である垂直走査低コヒーレンス干渉法や[3][5]，点合焦輪郭曲線法の 1 種であるナイフエッジ法による測定結果[6]にも見られることから，この過剰応答は LSM に限定されないある程度光学式測定機に共通する現象であると思われる．

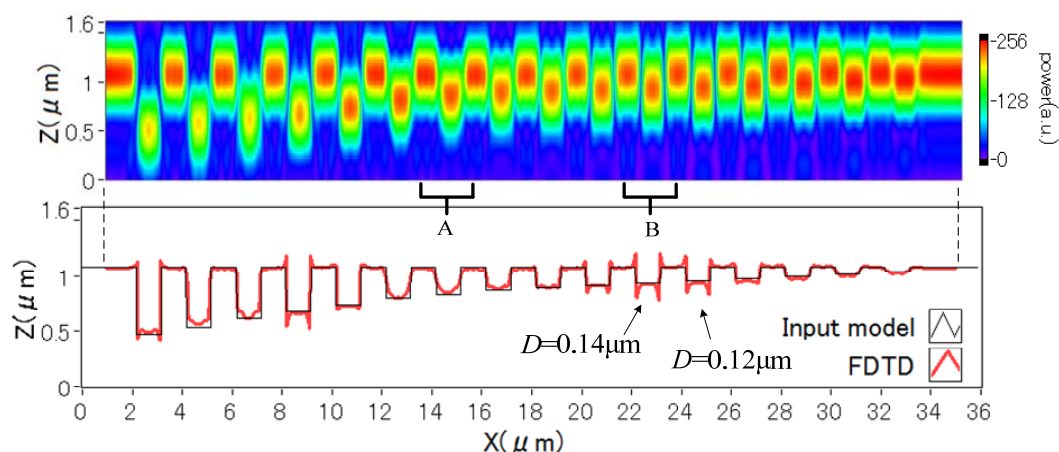
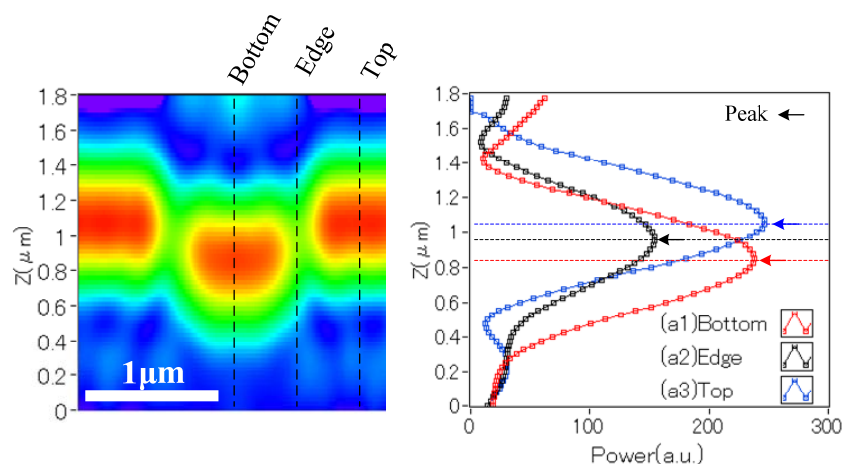


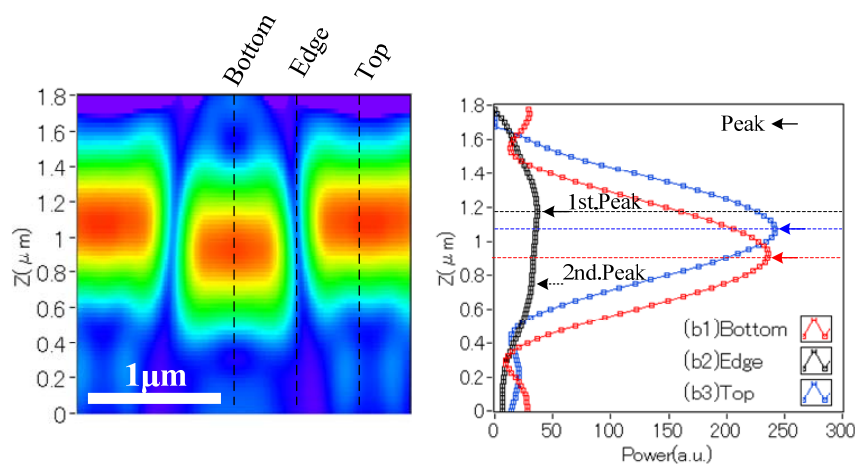
図 4.9 深さの異なる矩形状断面波形に対する応答 ($NA=0.80$)

図 4.10 は図 4.9 図中で示した A 部，B 部の光検出強度分布の部分拡大画像と矩形波の上面，下面，およびエッジ位置における検出強度の変化曲線である．なお，光検出強度画像については強度の低い部分の画像を見やすくするために γ 補正 ($\gamma=2$) をした画像を表示した．光検出強度分布を比較すると，異常値の発生した(b)B 部のエッジ位置では異常値の

発生しない(a)A 部のエッジに比べ光検出強度が暗い．この暗い部分の光検出強度の変化曲線 (b2)を見ると強度のピークが小さいだけでなく，他の変化曲線に比べその形そのものが異なり，わずかに2つ目のピークの存在が認められる．光検出強度画像にみられる強度分布の傾向から判断して，この2つのピークは矩形波の上面と下面に対してデフォーカスした際に得られるそれぞれの面からの反射・散乱光を検出した結果であると考えられる．つまり本来検出すべきフォーカス時の信号が弱く，相対的に大きくなったデフォーカス時の信号が複数のピークとなって現れ，結果としてこのデフォーカス時のピークを誤検出したのが矩形波のエッジ部における異常値の原因であると思われる．このことは図 4.5 で示したような正弦波の傾斜面における異常値の発生原因と類似している．



(a) A 部 (エッジ部に異常値無し)



(b) B 部 (エッジ部に異常値あり)

図 4.10 光検出強度分布の部分拡大画像と光検出強度の変化曲線

次にエッジ部の光検出強度が段差量に応じて変化する原因を明らかにするために、図 4.11 に示すようなモデルを使って段差部で発生する幾何光学的な光路長差について考える。

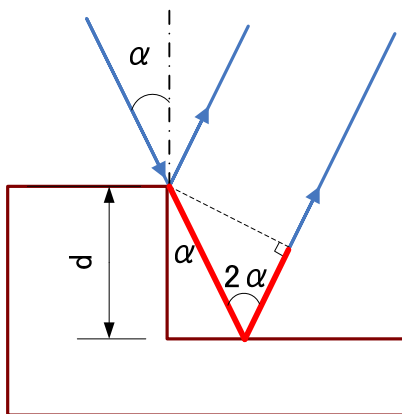


図 4.11 段差で発生する光学的な光路長差

段差の上面と下面での反射光の間で発生する光路長差 OPD は、図中赤色の線分の長さで表され、段差を d ，光の入射角を α とすると、

$$OPD = d \times \frac{1 + \cos 2\alpha}{\cos \alpha} \quad (4-2)$$

となる。上面と下面からの反射光が干渉で互いに弱めあう条件は OPD が $\lambda/2$ の奇数倍となる場合であるから、例えば $OPD = \lambda/2$ となるときの d を求めると、(4-2)より

$$d = \frac{\lambda}{4} \times \frac{2 \cos \alpha}{1 + \cos 2\alpha} \quad (4-3)$$

となる。図 4.9 の例では $NA=0.80$ なので光の入射角 α は $0 \sim \sin^{-1} 0.80 = 53.1$ 度の範囲内で分布する。光のエネルギーの重心となる角度は光学系に瞳面内の強度分布によっても変化するが、仮に光強度の重心角度が $\alpha = 20$ 度であったとすると式(4-3)より $d = 1.06 \times (\lambda/4)$ 、重心角度が $\alpha = 30$ 度であったとすると $d = 1.15 \times (\lambda/4)$ 、同様に $\alpha = 40$ 度であったとすると $d = 1.31 \times$

($\lambda/4$) となる．つまり光路長差 $\lambda/2$ を生じる段差 d は $\lambda/4$ ($\approx 0.1\mu\text{m}$)よりも数%~数十%大きい値となる．図 4.9 の例の場合にはこれが $D=0.12\sim 0.14\mu\text{m}$ 付近(つまり $\lambda/4$ の 20~40% 大きな段差) で発生したと考えられる．

このように図 4.9 で示したようなエッジ部の光検出強度が段差量に応じて変化する理由は段差部で発生する光路長差と光の干渉条件で説明可能と考える．

4.4.2 三角波状断面の場合

図 4.12 は三角波状断面を持つグレーティングのシミュレーション結果である．空間波長 T を $2\mu\text{m}$ に保ったまま三角波の頂角を $123\sim 166$ 度まで段階的に変化させた．頂角が大きい場合には概ね正しく測定されるが，鋭角に近づくとき山と谷部がわずかに 2 つ山に割れ，異常値となる傾向がある．光検出強度分布からは明確な異常値の発生原因は分らないが，先にも述べた正弦波や矩形波の解析結果から類推すると，鋭角部ではエッジを構成する 2 平面の傾斜角度によって光検出強度の低下が大きく，その結果として相対的に大きくなったデフォーカス時の散乱光の検出強度を誤検出することによって 2 つ山の異常値が発生したと想像する．

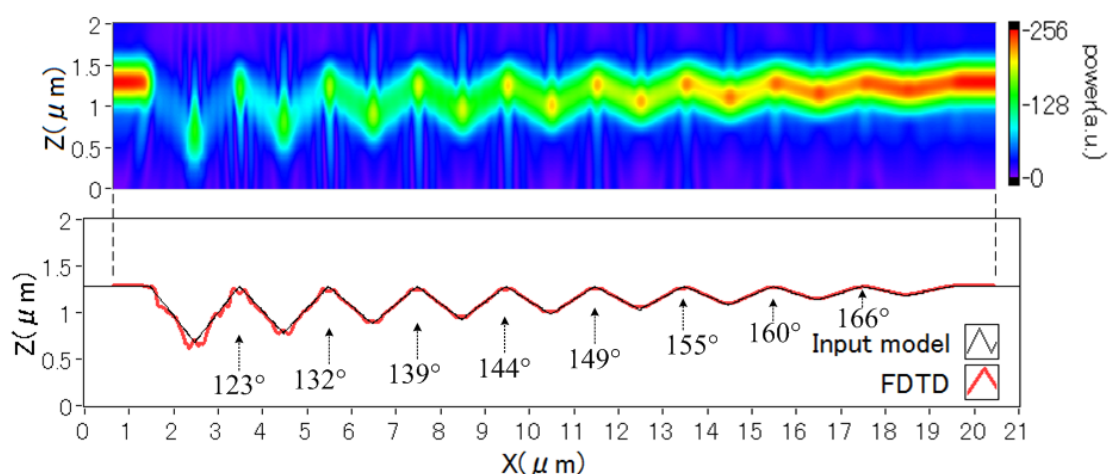


図 4.12 頂角の異なる三角波状断面波形に対する応答 (NA=0.95)

4.5 空間波長検出限界の検定用標準片に関する考察[4][7]

ISO 規格[8]では空間波長検出限界の定義を「正弦波の振幅の応答が 50%に低下する時の表面波長」としている．しかしながらそれに用いる正弦波標準片の振幅については言及が無い．他方，正弦波断面ではなく第 1 章の図 1.16 で示したような矩形波状断面の放射溝の標本を用いて空間波長検出限界を検定する試みも報告[9]されているが，矩形波で代用することの是非については検討の余地が大きいと考える．

そこで，断面波形による応答の違いを見るために図 4.13 に示すような振幅の異なる正弦波と矩形波断面を持つ標本にて応答のシミュレーションを行い，それらの結果を比較した．このシミュレーションモデルはそれぞれ正弦波もしくは矩形波の表面波長を等比級数的に変化させたチャープ波形となっている．正弦波と矩形波 2 つの波形に対して，振幅が 2 種類(240nm, 160nm)，合計 4 種の形状モデルにてシミュレーションした．

正弦波の図 4.13(a)と(b)を比較すると，振幅の大きな図中(a)の矢印部に多く異常値が見られる．振幅の小さな(b)では異常値が減ることから，(a)の異常値は図 4.4(b)同様の正弦波の局所傾斜角の大きさに起因したものであると考えられる．

矩形波の図 4.13(c)と(d)を比較すると，振幅の小さな(d)にてエッジ部に異常値が発生している．これは 4.4 節で述べたエッジの上面と下面からの反射光の干渉が原因であると思われる．

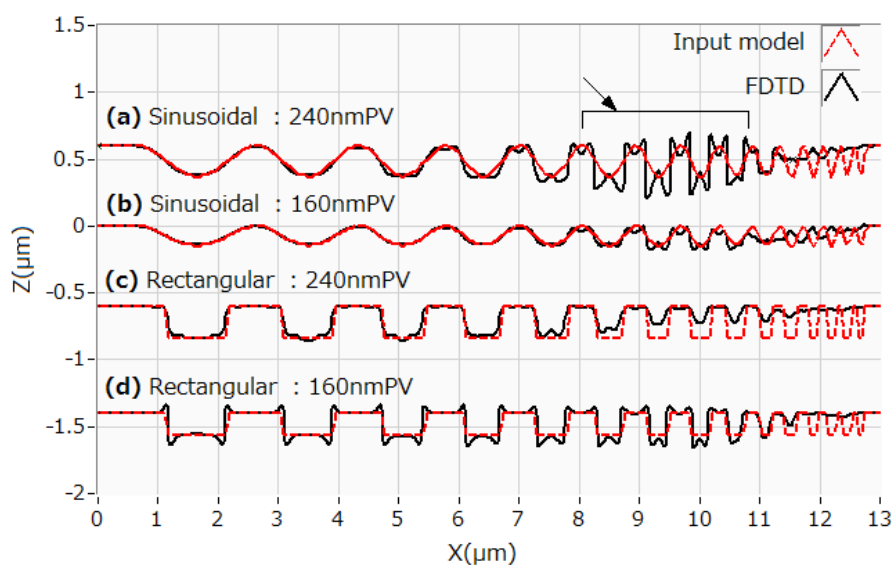


図 4.13 波形及び振幅の影響 (NA=0.95)

図 4.13 で示した 4 つシミュレーション結果を基に、表面波長に対する振幅の応答のグラフとしてまとめたのが図 4.14 である。なお、このグラフでは異常値も測定された振幅の一部とみなして応答の値を算出した。応答グラフの傾向から分かるように、用いる標準片の波形や振幅によって得られる応答特性は違ったものになる。このような応答特性のグラフを用いて空間波長検出限界（=振幅の応答が 0.5 となる表面波長）を検定することは一義的な検定方法とは言えない。

これらの応答の結果は純粋に表面波長に対する応答を見たものではなく、矩形波のエッジや正弦波の局所傾斜の影響も含んだものと思われる。これら表面波長以外の要因が支配的となる応答挙動については、空間波長検出限界の検定とは切り離して考えるべきである。

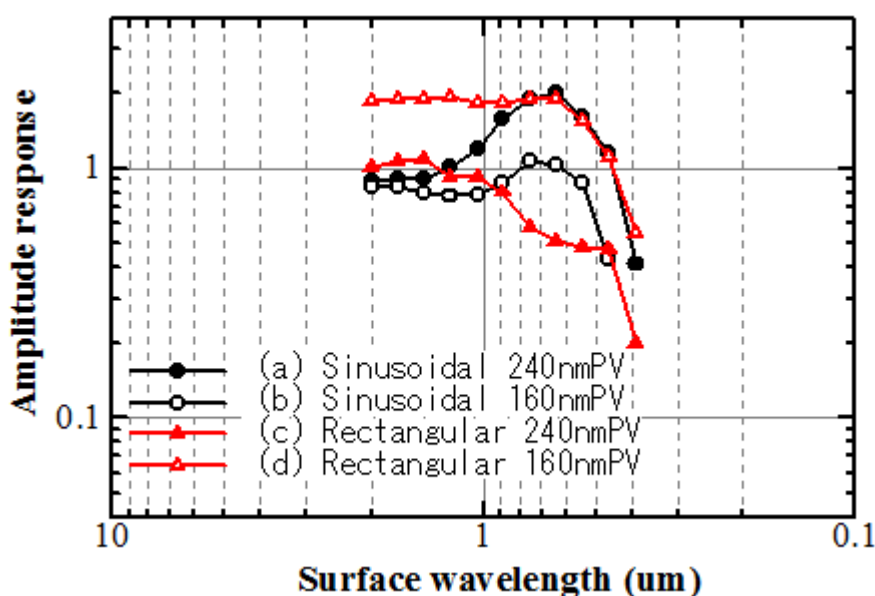


図 4.14 標準片の波形や振幅が応答特性に与える影響

一般の工業表面は正弦波に見られるような局所的な傾斜や曲率を有する場合が多い。矩形エッジなどの形状はやや特殊なケースであると思われる。空間波長検出限界は正弦波で定義されていることを考えると、やはり正弦波での評価を基本とすべきと考えた。そこで、次に局所傾斜角を一定とした正弦波での応答挙動について評価した。図 4.15 は NA の異なる 3 つの測定条件に対して、傾斜角度を一定に保ちつつ表面波長を挿引した正弦波状断面でのシミュレーション結果である。この標本モデルでは正弦波 1 周期中の最大傾斜角を一

定にしているので、表面波長の影響だけを評価可能となる。なお、これと同じ設計思想の実標本の製作については第 5 章で詳しく述べる。

図 4.15 において同一 NA のデータ（例えば(c)と(d)）を比較すると、局所傾斜角が大きくなると最大傾斜部にて異常値が発生する傾向がある。同一傾斜角で比較すると、（例えば(b)と(c)） NA が大きいほど異常値は低減する。明らかな異常値が発生しないのは $NA=0.60$ の場合で 10 度、 $NA=0.80$ の場合で 20 度、 $NA=0.95$ の場合で 30 度であった。このような異常値の発生しない正弦波における最大局所傾斜角は光学式測定機の計測能力を示す重要な指標である。1.6.3 でも触れたように ISO 規格案では評価方法は明確になっていないが、正弦波を用いた場合の異常値の発生しない限界角を「最大局所傾斜角 (Maximum local slope)」とするのが適切な検定方法ではないかと考える。この考え方による検定結果を最大局所傾斜角の特性値とし、測定機の利用者に公表してゆくことは、測定データの信頼性向上に繋がると思われる。

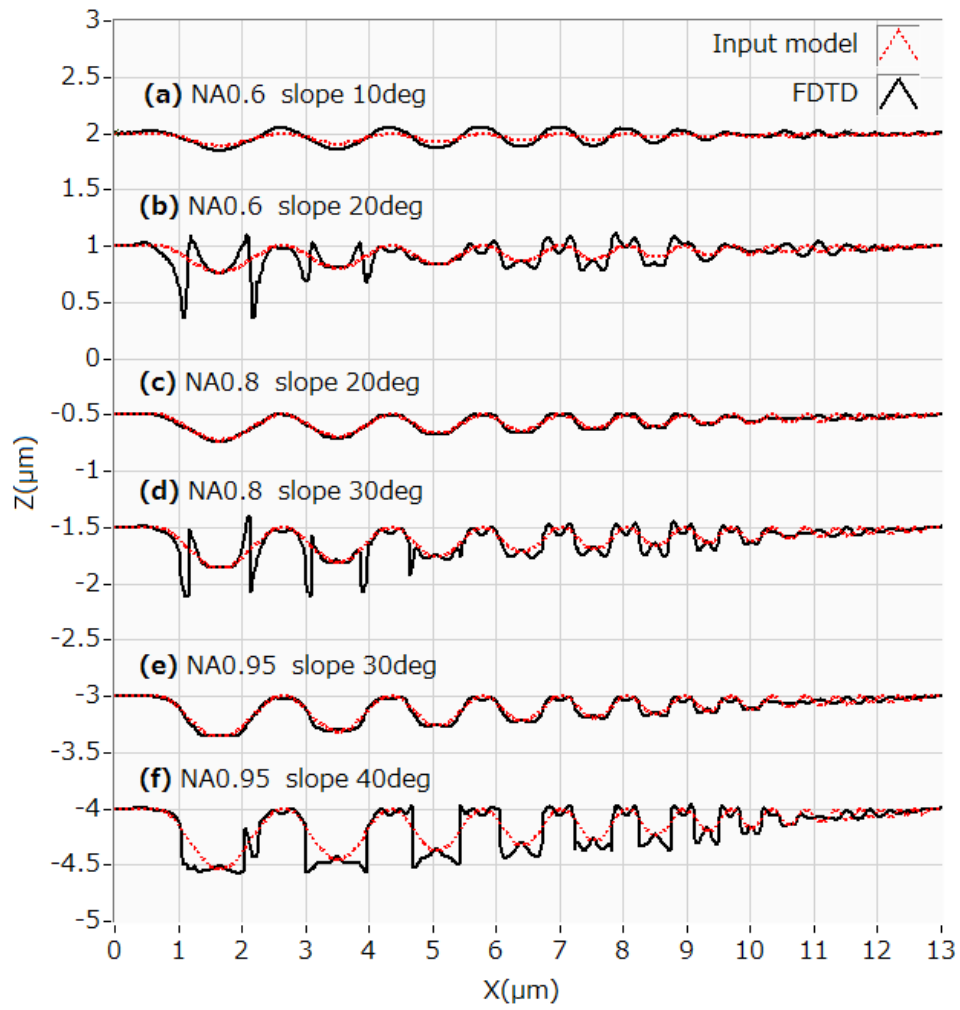


図 4.15 最大局所傾斜角を一定にした場合の正弦波形に対する応答挙動 ($\lambda=0.405\mu\text{m}$)

4.6 測定標準面の設計指針[1]

これまでの検討結果で示したように、測定標準面の表面波形を設計する場合、集光スポット内の局所形状が重要な設計要素となる。このとき、解析対象面に集光した最小の集光スポットの範囲内だけではなく、測定対象物の凹凸高さと同程度のデフォーカスによって広がった集光スポットの範囲内で考える必要がある。以下では本研究により得られた局所形状に関する知見と、図 4.16 で示すような ISO 規格[10]で定められた標準片の具体寸法に対する設計指針についてまとめる。

4.6.1 傾斜平面

幾何光学どおりの応答が期待できるため、 NA と検出可能な傾斜角の関係を考慮すればよい。但し、実際に測定できる傾斜角度は測定機の微弱光の検出能力によって制限されることには注意を要する。

4.6.2 正弦波状断面

傾斜が大きいほど、空間波長が短いほど、異常値を誘発しやすく正しい測定が難しくなる。異常値の出現の有無は NA に敏感である。光学式測定機の NA は大きくても本研究の検討条件と同じ $NA=0.9$ 前後であることを考えると、異常値の発生しない安定した測定が期待できるのは、局所最大傾斜角で 30 度程度が限界と思われる。空間波長は集光スポットの大きさと同程度が測定の限界である。

4.6.3 エッジ状断面

矩形波状断面の場合、集光スポットエリア内の凹凸高さが光源波長の $\lambda/4$ を越える場合に異常値が発生しやすくなる。異常値の出現する段差は対物レンズの NA によっても多少変化する。図 4.16(b), (d) のような X, Y 軸の座標系の校正用途の標準片であればエッジ部の異常値は X, Y 座標値に影響しにくいため、段差量は自由に設計しても問題はない。しかし図 4.16(a) のような Z 軸の校正用途の場合には、エッジ近傍での異常値と平坦部での正常値を明確に区別できるように集光スポットサイズに対して十分広い平坦部をもつ矩形段差とすべきである。図 4.16(e) のような空間波長に対する Z 軸方向の応答の検定用途の標準片

の場合は平坦部の大きさを自由に設定できないため、異常値の発生しない $\lambda/4$ 以下の段差にすべきである。

三角波状断面の場合、頂角が鋭角であるほど頂点部で2つ山状の異常値が発生しやすい。光学式測定機にとって、鋭角な三角波断面の場合は矩形波断面や正弦波断面に比べ、応答が非常に複雑であり、高い再現性が求められるような校正用途の測定標準面としては不向きである。

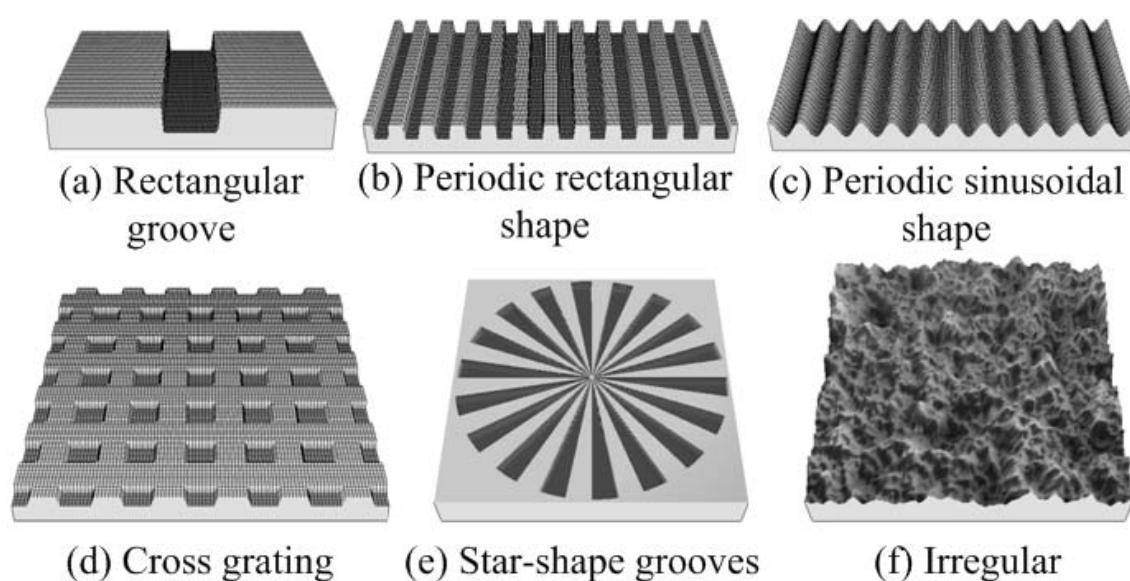


図 4.16 ISO の定める校正用標準片[9]の例

なお、本研究では走査型レーザ顕微鏡を解析対象測定機としたが、異常値の発生傾向については第1章の1.7.2項でもいくつか紹介したように垂直走査低コヒーレンス干渉計をはじめとする異なる光学式測定機についても共通の発生傾向を持つ場合があることから、上述の設計指針はある程度の一般性を持っていると想像する。

4.7 まとめ

1. 光学プローブサイズ内の局所形状に注目して、標本形状を3つの形状要素（傾斜平面，湾曲面，エッジ）に分類し，これら基本形状に対する走査型レーザ顕微鏡の応答挙動を解析した．
2. 新たに開発したベクトルシミュレーション手法によって従来のスカラー理論では解析できなかった走査型レーザ顕微鏡の異常値の発生メカニズムを明らかにした．異常値は本来検出されるべきフォーカス状態での信号が弱く，その結果として相対的に強くなったデフォーカス時の信号を誤検出する場合に多く発生することが分かった．
3. 対物レンズの NA が大きいほど，標本の局所傾斜角が小さいほど，異常値の発生を抑制できることを明らかにした．
4. 空間波長検出限界は光学式測定機の測定能力を示す重要な性能指標であることを示すと共に，これを統一的な解釈のもとで評価する必要性について述べた．
5. 基本形状に対する応答挙動の解析結果，及び異常値の発生メカニズムを踏まえた上で校正，または検定用の測定標準面（標準片）の設計指針についてまとめた．

参考文献

- [1] 藤井章弘, 林 真市, 藤井信太郎, 寺沢智丈, 柳 和久, 光学式表面性状測定機の基本形状に対する応答挙動の解析, 精密工学会誌, vol.80, no.9 (to be published)
- [2] Richard Leach (Editor), *Optical measurement of surface topography*, Springer (2011)
- [3] F Gao, R K Leach, J Petzing and J M Coupland, Surface measurement errors using commercial scanning white light interferometers, Meas. Sci. Technol., 19 (2008) 015303
- [4] A Fujii, S Hayashi, S Fujii, K Yanagi : Analytical study on optically measured surface profiles of referential geometry using a FDTD method, Surface Topography: Metrology and Properties 2 (2014) 014004
- [5] Akiko Harasaki and James C. Wyant, Fringe modulation skewing effect in white-light vertical scanning interferometry, Applied Optics, vol39, no.13(2000)pp2102-2106
- [6] 深津拓也, 異常値抑制効果と斜面对応機能を有す光触針式輪郭形状センサの開発, 長岡技術科学大学 博士論文(2006)
- [7] 藤井章弘, 柳 和久, 光学式の表面性状測定機を対象とした短波長測定限界に関する一考察, 2012 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, F61 (2012) pp.479-480
- [8] ISO 25178-3:2012, Geometrical Product Specifications (GPS) — Surface texture : Areal — Part2; Specification operators
- [9] A Fujii, H Suzuki, and K Yanagi, A study on response properties of surface texture measuring instruments in terms of surface wavelength, Proceedings of ASPE Summer Topical Meeting on Precision Interferometric Metrology, 49 (2010) pp.91-96
- [10] ISO 25178-70:2014, Geometrical Product Specifications (GPS) — Surface texture : Areal — Part70; Material measures

第5章 空間波長検出限界の検定を目指した新しい標準片の開発

第2章で述べたように異種測定機間のデータを対等に比較するためには解析する波長帯を統一することが重要である。そのためにも各種測定機、測定条件ごとに空間波長検出限界（Lateral period limit）を正しく検定することが重要となる。本章では第4章で得られた標準片の設計指針を踏まえ、空間波長検出限界を検定するための新しい標準片の開発結果について述べる。そして、この標準片を実際に製作し、いくつかの市販測定機に対して空間波長検出限界の検定を行った結果について述べ、異常値の取り扱いに関する一提案を行う。

5.1 標準片の設計方針

単一の表面波長の矩形波や正弦波を断面とするグレーティング状の測定標準面はいくつか市販されている[1][2]。しかし第2章で行ったような多数のグレーティング標本を用いた応答特性の解析は多くの時間と労力を必要とするため、実践的な方法とはいえない。1回の測定で様々な表面波長に対する応答を評価可能とするために、放射状の溝を持つ測定標準面も提案されている[3][4]。これは電子線リソグラフィ技術を用いる事で比較的容易で安価に製作できるといった理由から矩形波状の断面となっている。しかし第4章で述べたように矩形波状断面の場合、その段差量に応じてエッジ部での応答挙動が異なるため、表面波長に対する振幅の応答を評価することを目的とした標準片として使用するには課題が残る。そもそも空間波長検出限界の定義は正弦波の振幅に対する応答で定義されているので、矩形波で代用すること自体が検討の余地が大きい。また、正弦波形の場合であっても図4.15で示したようにその局所傾斜角（つまりアスペクト比）によっても応答は異なることも考慮されるべき点と考える。傾斜角度に対する応答は一般の工業表面の計測にとって重要な評価指標であってユーザの関心も高いことから傾斜の限界角も1つの評価指標とすべきである。そこで以下の項目を本章で開発する新しい標準片の設計方針とした。

－表面波長に対する振幅の応答を1つの標本で検定可能なこと。

－傾斜角に対する計測限界も評価できること

5.2 振幅変調型チャープ波形モデルの設計[5]

少ない測定回数で様々な波長に対する応答を求めることができるように、X 方向の断面形状がチャープ波形のように空間的に変化する波形を考案した。通常のチャープ波形の場合、波長挿掃と共にアスペクト比、つまり局所傾斜角も変化してしまうため、表面波長だけの影響を捉えるのが難しい。そこで我々は正弦波形のアスペクト比が常に一定となるように波長だけでなく振幅にも変調を与えるような振幅変調型のチャープ波形を考えた。次項でその波形の詳細について述べる。

5.2.1 測定標準面の設計と数式モデル

考案した新しい波形は正弦波信号単純に挿引したチャープ信号ではなく 1 周期分の余弦曲線を滑らかに接続したパターンとした。その理由は、1 周期内では変調の影響の無い理想的な単一波長の正弦形状にできること、および所望の波長の組み合わせが設定できるのでパターン設計の自由度が高いからである。

接続する表面波長列を T_n とする。但し $n=1,2,3,\dots,N$ である。広い表面波長帯を網羅できるように、接続する波長は式(5-1)のように等比級数的に変化させた。

$$T_{n+1} = aT_n \quad (5-1)$$

ここで a は等比級数の公比である。

$f_n(x,y)$ を表面波長 T_n の 1 周期分の余弦波とし、その両振幅を 1 とすると、

$$f_n(x,y) = \begin{cases} 0 & \left(x < \sum_{i=1}^{n-1} T_i \right) \\ \frac{1}{2} \left\{ \cos \left[\frac{2\pi}{T_n} \left(x - \sum_{i=1}^{n-1} T_i \right) \right] - 1 \right\} & \left(\sum_{i=1}^{n-1} T_i \leq x < \sum_{i=1}^n T_i \right) \\ 0 & \left(\sum_{i=1}^n T_i \leq x \right) \end{cases} \quad (5-2)$$

$f_{n-1}(x,y)$, $f_n(x,y)$, $f_{n+1}(x,y)$ を加算すると、図 5.1 で示すように異なる波長の余弦曲線の微分係数

がゼロとなる位置で滑らかに接続された曲線となる。

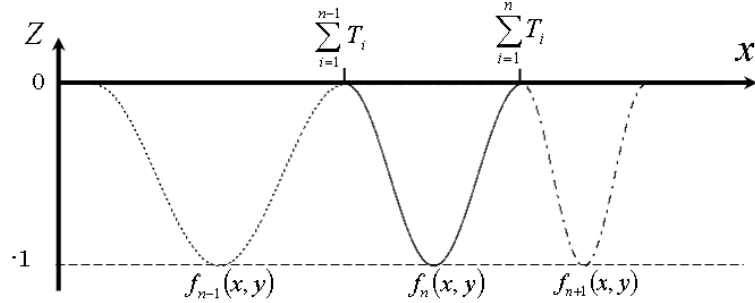


図 5.1 等比波長列の余弦曲線の接続

ここで余弦波 1 周期中の最大の傾斜角度が一定になるように、波長に応じて余弦波の振幅に変調を与えることを考える。 (5-2)式で示した波形 $f_n(x, y)$ の傾きの最大値を m_n とすると、

$$m_n = \max \left\{ \frac{\partial f_n(x, y)}{\partial x} \right\} = \max \left\{ -\frac{1}{2} \times \frac{2\pi}{T_n} \times \sin \left(\frac{2\pi}{T_n} \times \left(x - \sum_{i=1}^{n-1} T_i \right) \right) \right\} = \frac{\pi}{T_n} \quad (5-3)$$

余弦波 1 周期中の最大傾斜角度が $\theta(y)$ となるように $f_n(x, y)$ の振幅に変調を与え、図 5.2 に示すようにそれらの曲線を加算して得られる測定標準面の断面曲線 $Z(x, y)$ は 次式となる。

$$Z(x, y) = \sum_{n=1}^N \left(\frac{\tan \theta(y)}{m_n} f_n(x, y) \right) = \sum_{n=1}^N \left(\frac{T_n \tan \theta(y)}{\pi} f_n(x, y) \right) \quad (5-4)$$

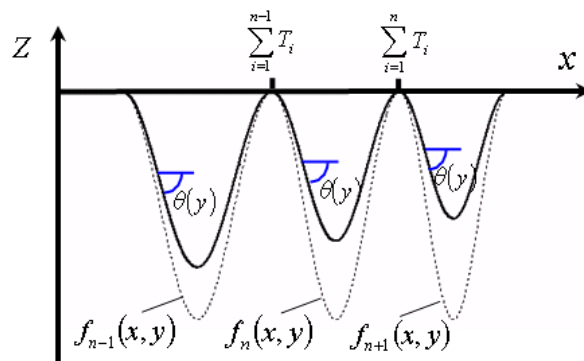


図 5.2 局所最大傾斜角を一定に保ったチャープ波形

ここで $\theta(y)$ を y の関数とした理由は、測定標準面の Y 方向の位置に応じて最大局所傾斜角を変化させるためである。さらに、測定結果の断面解析を行う際のサンプルの測定箇所の特定を容易にするために、 $\theta(y)$ を次式で示すように離散的に変化させた。

$$\theta(y) = \Delta\theta \times \text{floor}\left\{\frac{by + c}{\Delta\theta}\right\} \quad (5-5)$$

式中の演算記号 $\text{floor}(x)$ は実数 x 以下の最大の整数を表し、 $\Delta\theta$ は局所最大傾斜角度の離散ステップ角度、 b 、 c は角度やその変化の程度を決定する定数である。図 5.3 に設計モデルイメージを示す。

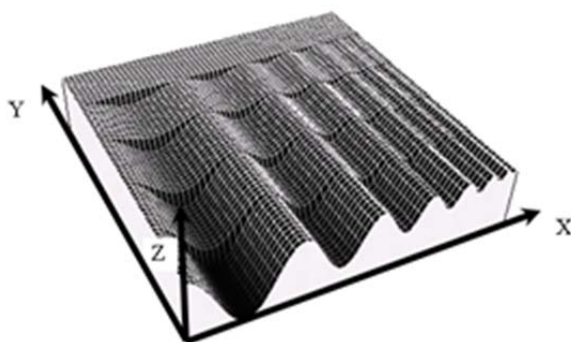


図 5.3 振幅変調型チャープ波形の設計モデルイメージ

5.2.2 設計パラメータ

測定機の光学仕様にあわせて、標準片の寸法を 2 種類 (Type A, B) 考えた。2 種の設計パラメータを表 5.1 に示す。

表 5.1 設計パラメータ

	Type A	Type B
Maximum surface wavelength : T_0	2.0 μm	5.0 μm
Number of wavelengths : n	15	15
Common ratio of geometric sequence: a	0.85	0.85
Minimum surface wavelength	0.21 μm	0.51 μm
Maximum slope angle	5 \sim 45deg	5 \sim 30deg
Angular digitization step : $\Delta \theta$	5 deg	5deg
Angular proportional parameter : b	-2	-1
Angular offset parameter : c	45	30

表 5.1 の Type A は光学式測定機の中で水平解像力の高い測定条件 (NA=0.95, 光源波長 $\lambda=0.405\mu\text{m}$) を, Type B は標準的な水平解像力を持つ条件 (NA=0.55, 光源波長 $\lambda=0.55\mu\text{m}$) を想定した設計である。想定した 2 つの測定条件における理論的な回折限界波長 λ_{oc} は $\lambda/(2NA)$ で与えられ, それぞれ 0.2 μm と 0.5 μm となる。そこで TypeA, B の表面波長 T_n の最小値として 0.2 μm と 0.5 μm に設定し, 最大値はこれらの 10 倍である 2 μm と 5 μm となることを設計パラメータの目安とした。この 10 倍の波長レンジを 15 個の波長に等比分割できるように公比 a は 0.85 とした。

第 4 章で述べたように光学式表面性状測定機にて正しく形状をトレースできる限界の角度としては 30 度程度と思われるが, Type A に関しては限界を超えた領域での挙動を確認するためにこれよりも大きな 45 度を最大局所傾斜角として設定した。Type B では 30 度を最大傾斜角とした。離散ステップ角度 $\Delta \theta$ は 5 度とした。

図 5.4 に Type A のモデリング結果を示す。図中の Unit Pattern が表 5.1 の設計パラメータ

から導きだされる形状であるが，次項で説明する FIB 加工に伴う加工歪みを抑えるために Unit pattern を 4 つ対称に配置した構造とした．

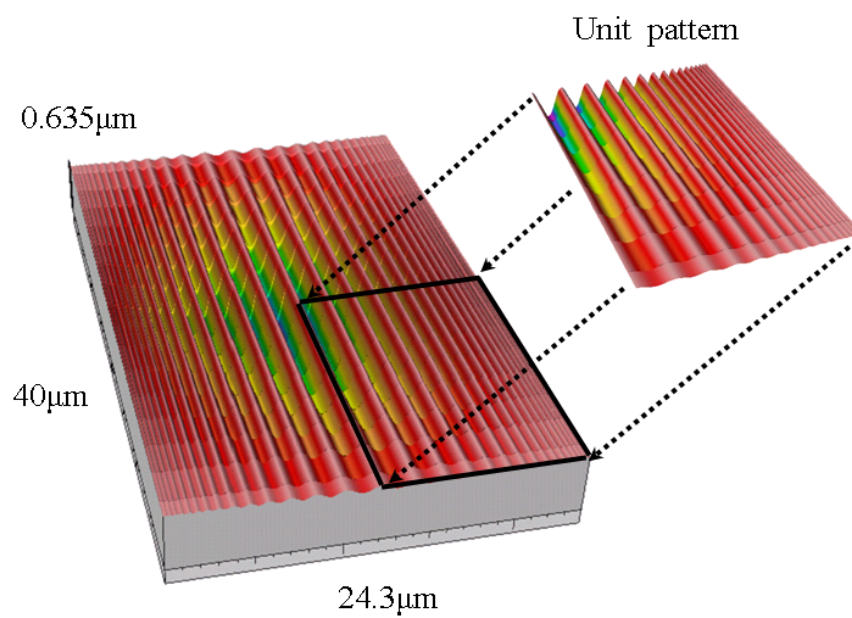


図 5.4 TypeA のデザインモデルの鳥瞰図

5.3 FIB 加工を用いた実標本の製作[5]

FIB 加工機（株式会社エリオニクス製 EIP-5400）を使って TypeA, B 2 種類の標準片を製作した．加工の手順は図 5.5 に示すようにまず 3D 設計データを FIB 加工機の除去単位となる $dx=dy=dz=10\text{nm}$ で量子化した層状データに変換し，表層に近い側から順次除去加工を行った．加工条件を表 5.2 に，完成した標準片のレーザ顕微鏡写真と AFM（オリンパス製 OLS3500 カンチレバー OMCL-AC200）による表面凹凸形状の測定結果を図 5.6 に示す．なお，AFM の測定結果は測定ストロークの都合上，一部の領域の測定結果のみを表示した．

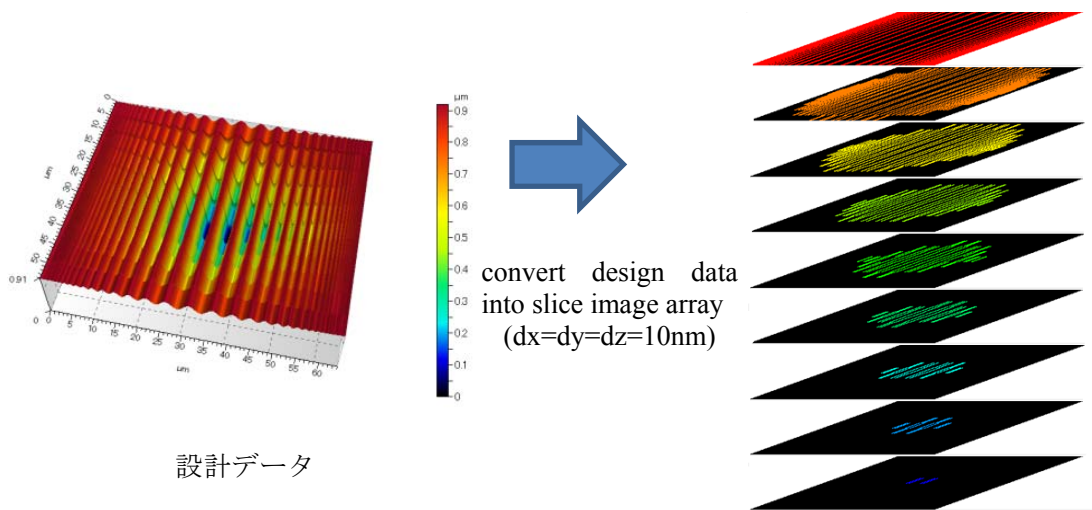
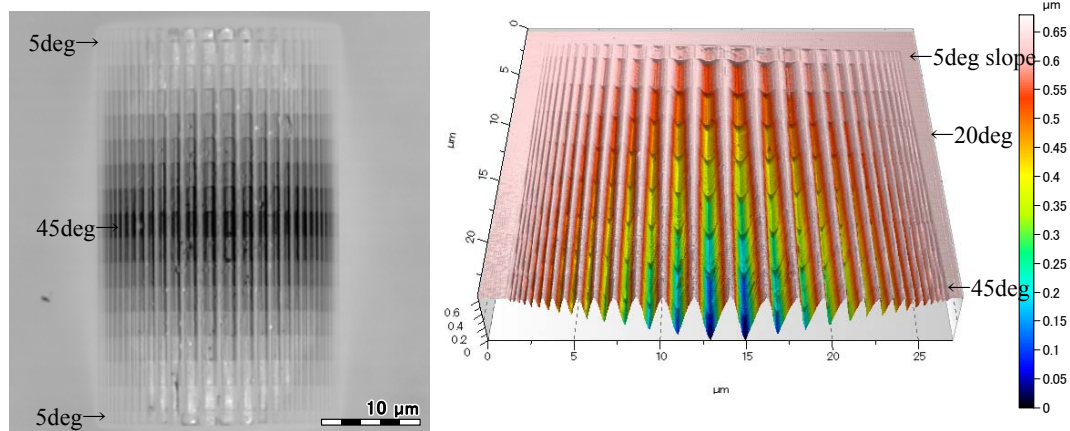


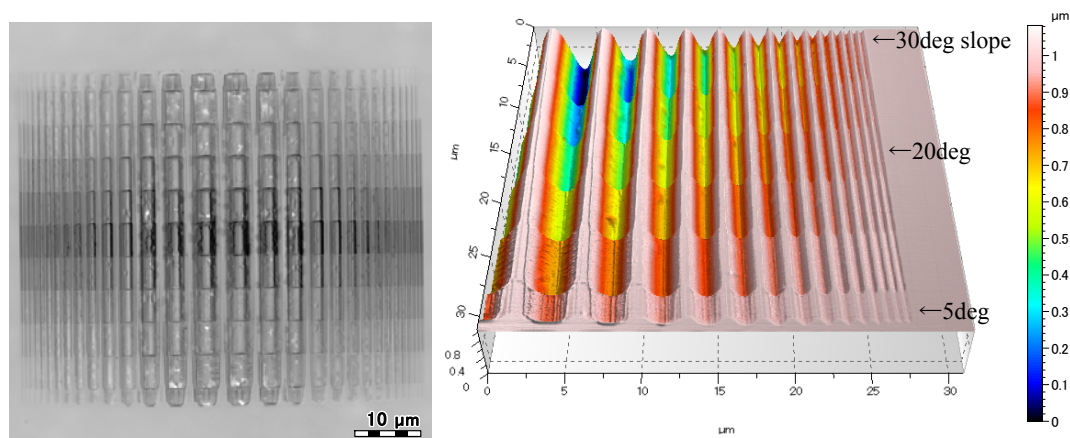
図 5.5 加工用データへの変換と FIB 加工手順

表 5.2 FIB 加工条件

Material	Single crystal silicon
Irradiate ion	Ga^+
Ion accelerating voltage	40 kV
Ion beam current	56 pA
Beam spot size	0.1 μm



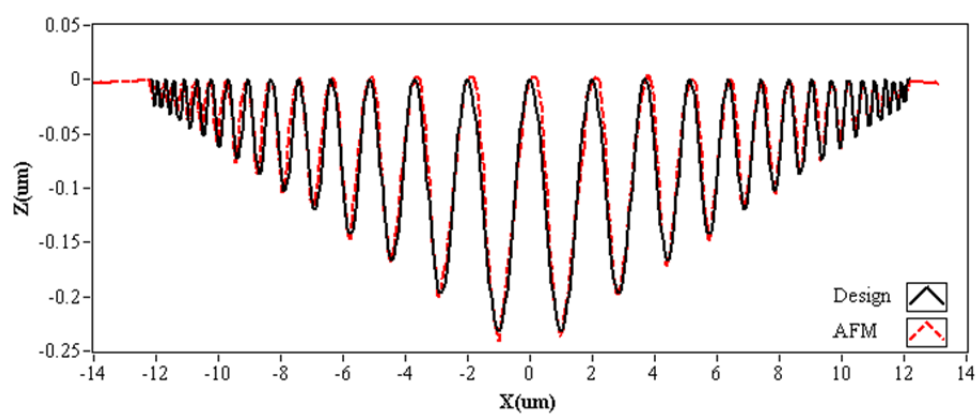
(a) Type A



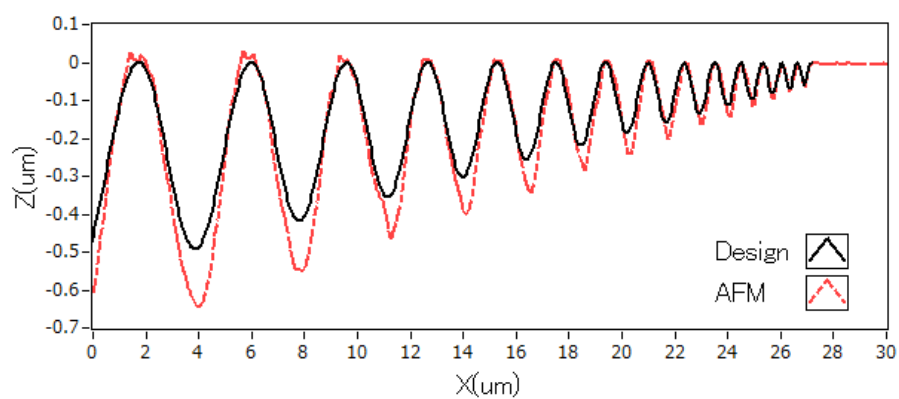
(b) Type B

図 5.6 FIB 加工により製作した標準片の顕微鏡写真(左)と AFM による測定結果(右)

図 5.7 に設計データと図 5.6 で示した AFM による測定結果の測定断面曲線を重ねて表示した結果を示す。Type A に関してはほぼ設計値どおりの断面形状となっている。Type B に関しては設計データよりも深く加工される傾向が見られたが、X 方向の表面波長に関しては設計どおりであった。なお、次節以降で行う光学式測定機の応答の解析には AFM による測定結果を標準片の校正データとするため、設計データとの乖離に関しては本研究においては問題とはならないことを付け加えておく。



(a) Type A (Maximum slope angle =20deg)



(b) Type B (Maximum slope angle =20deg)

図 5.7 FIB 加工した実標本形状と設計データの比較

5.4 様々な光学式測定機の応答特性の評価[5]

図 5.8 に走査型レーザ顕微鏡 ($NA=0.95$, $\lambda=0.405\mu\text{m}$) で Type A の標準片を測定した結果の鳥瞰図を示す。1 つの測定視野の中に全てのパターン領域が含まれているので、1 回の測定で表面波長が $0.2\sim 2\mu\text{m}$ に対する応答評価と、局所傾斜角の計測限界を一度に検定可能である。鳥瞰図を見ると、局所傾斜角が大きい標本の中心付近で多くのスパイク状のデータが見える。図 5.9 に異なる傾斜角度位置の断面プロファイルを AFM の測定結果と重ねて表示した。同図(c)よりこのスパイク状のデータは正弦波形の局所傾斜角の大きい部分で発生した異常値であることがわかる。これは第 4 章のシミュレーションの結果の図 4.4(b)からその出現が予測されたものと同一の異常値と思われる。

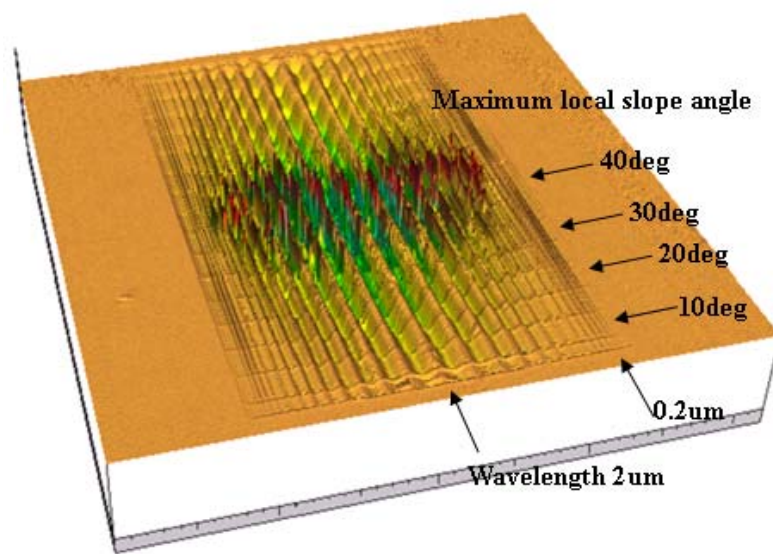


図 5.8 LSM($NA0.95$ $\lambda=0.405\mu\text{m}$)による Type A 標準片の測定結果

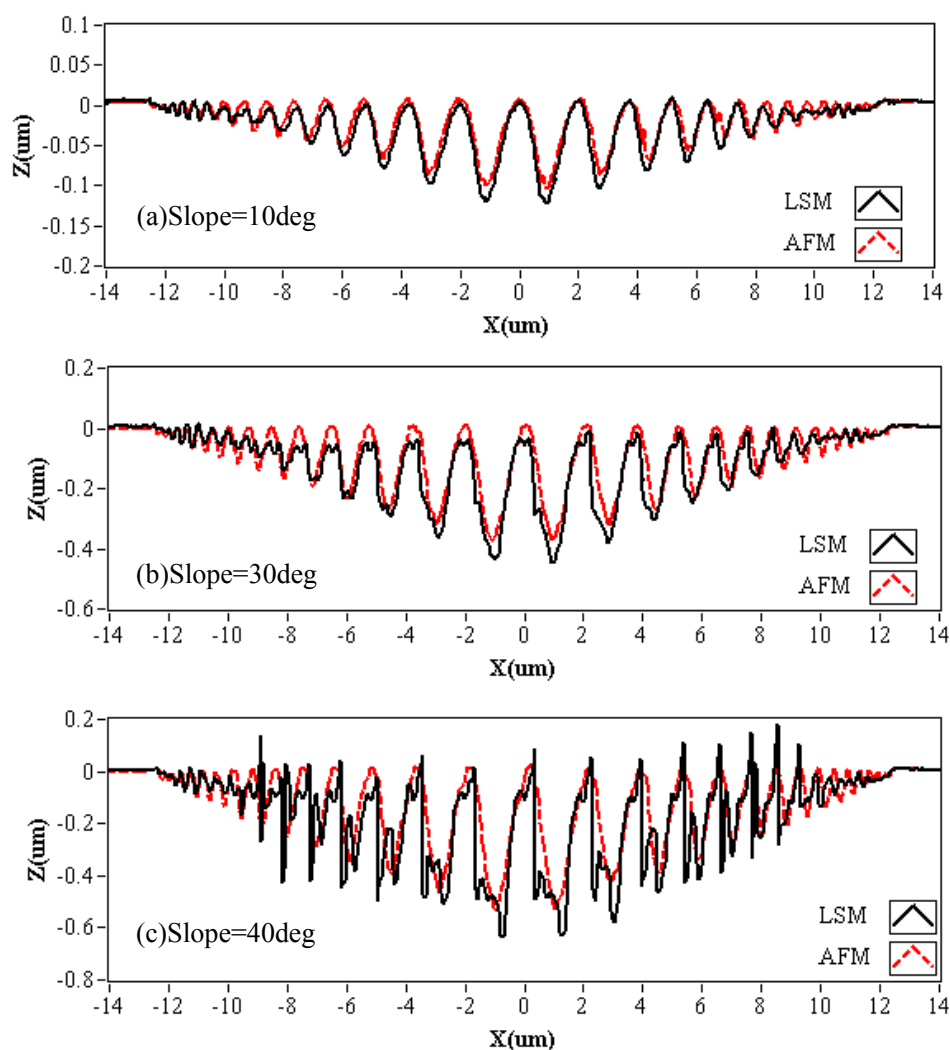


図 5.9 AFM と LSM の実測結果の比較

図 5.9 のような測定断面曲線のデータから表面波長ごとの振幅の値を決定する方法について図 5.10 を用いて説明する．図において輪郭曲線が不連続となっている箇所は測定機側が測定不能と判断しデータ出力されなかった測定ポイントである．振幅を求める際にはこのような不連続部は無効データとして解析対象から除外した．異常値の疑いはあるが，明らかに正弦波の形状ではない図中赤矢印のようなスパイク状のピークノイズは振幅の一部とみなさず無効データとした¹．無効データの存在によって測定される正弦波の振幅が特定できない場合は測定不能として振幅の測定は行わなかった．異常値の疑いはあるが，見た

¹ 明らかなスパイク状のピークノイズは第 1 章の参考文献[45]や[46]のような前処理ソフトウェアを使って除去できる可能性が高いため測定された振幅の一部とみなさず無効データとして取り扱った．

目から正弦波形の極値と区別がつかない黒矢印のような異常値は振幅の一部とみなし、応答特性のグラフに反映することにした。

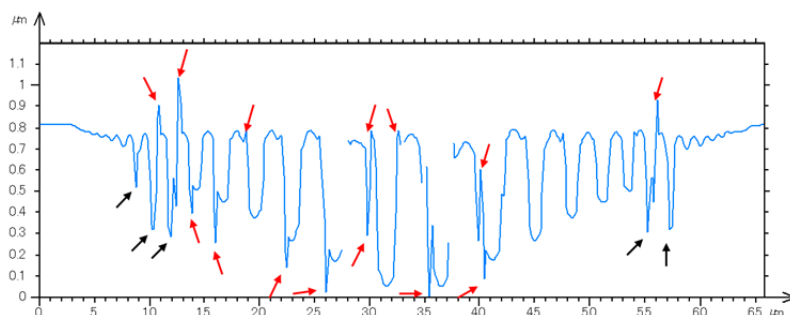


図 5.10 振幅値の判定方法

このようにして決定した振幅の値を図 5.6 で示した AFM による振幅の測定データで除した値、つまり振幅の応答をプロットすると、図 5.11 のようなグラフとなる。同図より傾斜角が 40 度を超えると、傾斜角が 30 度以下の場合に比べ応答曲線が違った傾向となっている。これは図 5.9(c)で示した断面曲線からも分かるように傾斜面での異常値の影響である。本研究ではこのような異常値の出現によって応答曲線が過剰応答気味になったり、緩斜面の曲線に比べ極端に不安定となる場合を測定の限界を超えた状態であると判定した。図 5.11 の例の場合には限界を越えないぎりぎりの角度 θ_{\max} 、つまり最大局所傾斜角は $\theta_{\max}=35$ 度と検定した。なお、空間波長検出限界の検定方法については第 5.5 節にて提案する。

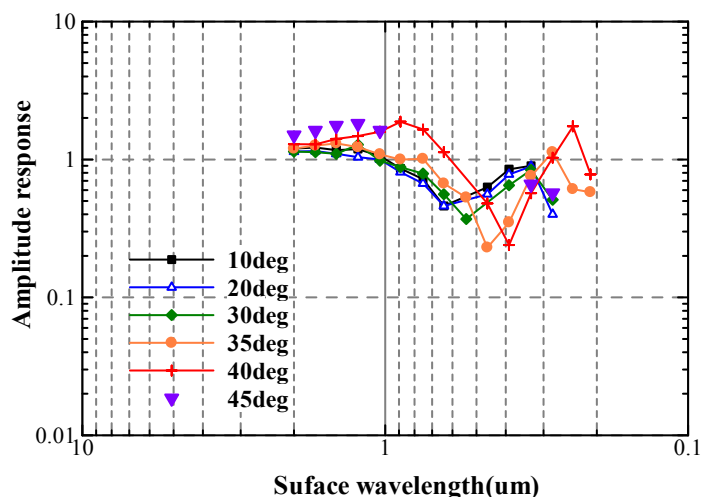


図 5.11 LSM (NA0.95 $\lambda=0.405\mu\text{m}$) の応答特性 標準片：Type A

同様の方法で行った 5 種類の測定原理（位相シフト干渉顕微鏡法、垂直走査低コヒーレン

ス干渉法，共焦点顕微鏡法，点合焦輪郭曲線法，全焦点画像顕微鏡法）の市販測定機 8 機種
の応答特性の評価例を図 5.12～図 5.19 に示す。

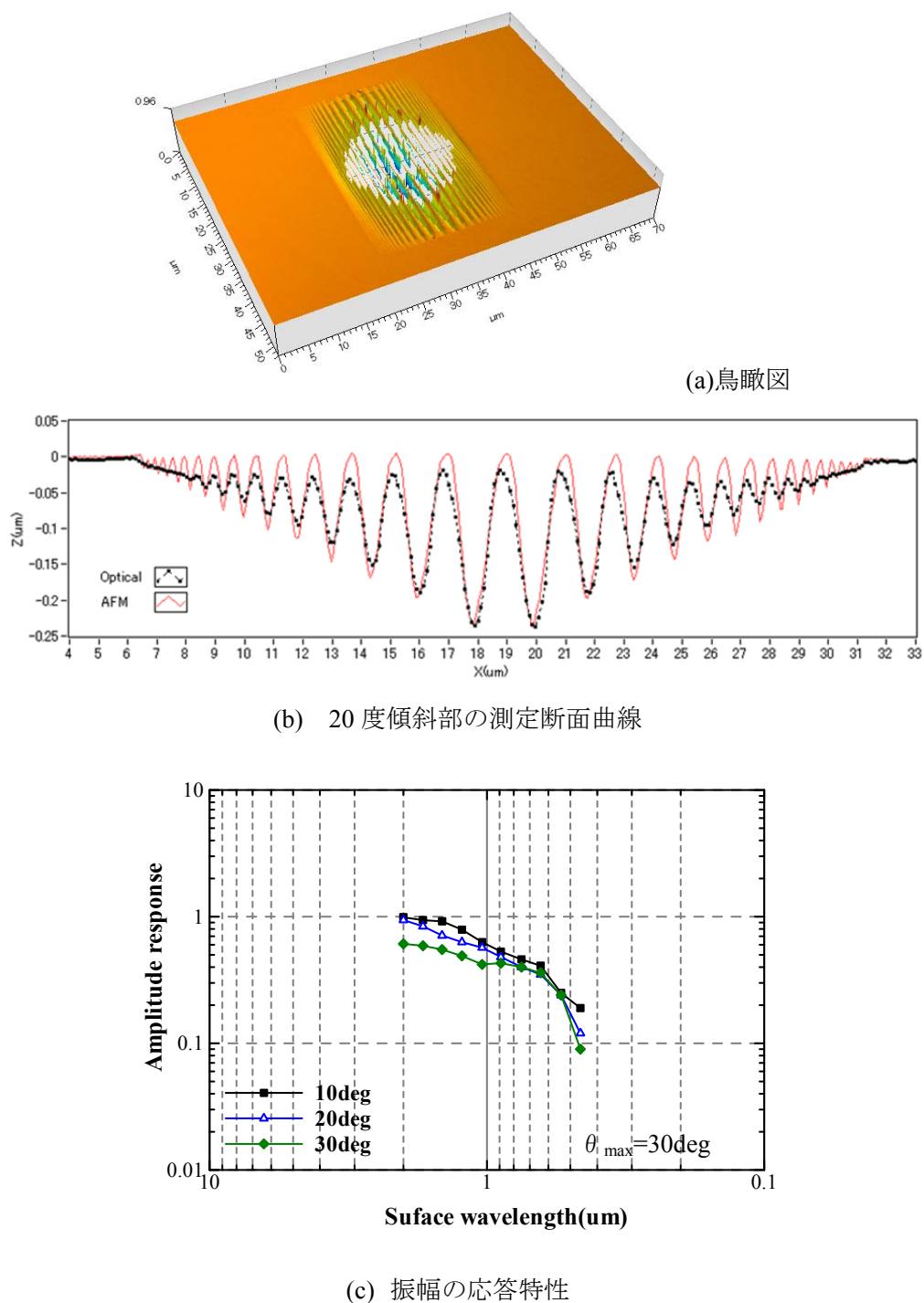
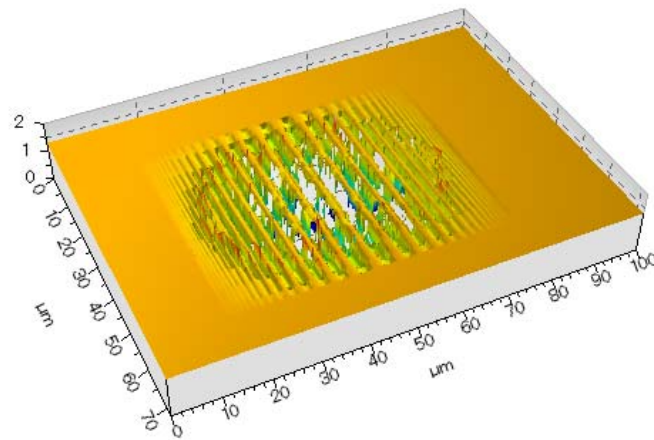
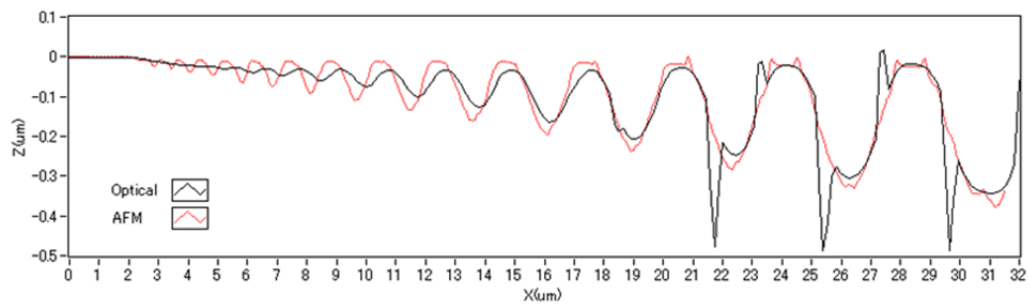


図 5.12 Instrument A (NA0.80) 標準片：TypeA

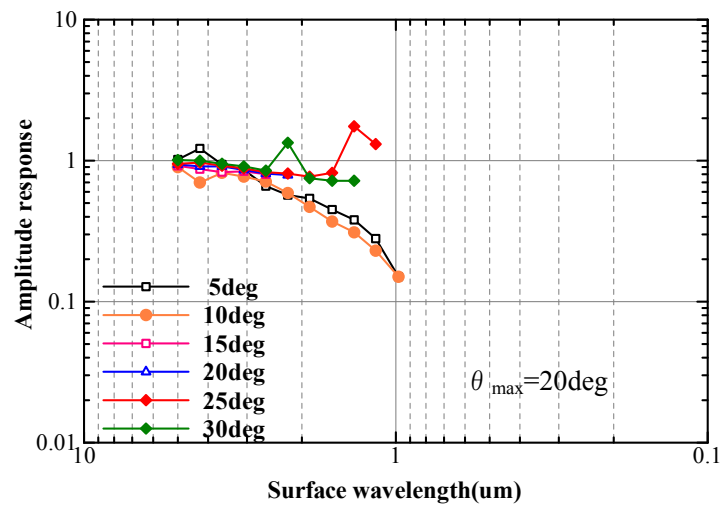
傾斜角 35 度以上で無効データが多く測定不能となったため，グラフ上にプロットできなかった。



(a)鳥瞰図



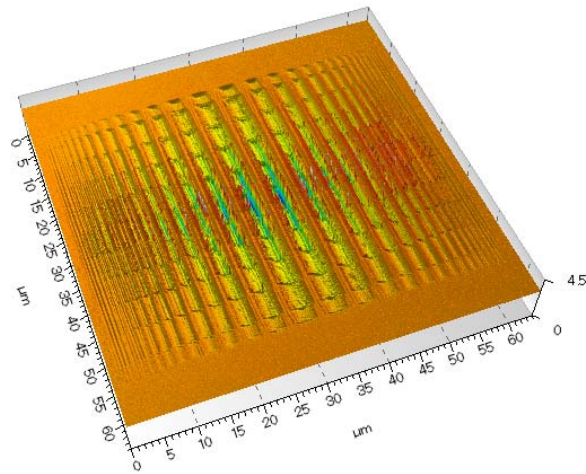
(b) 10度傾斜部の測定断面曲線



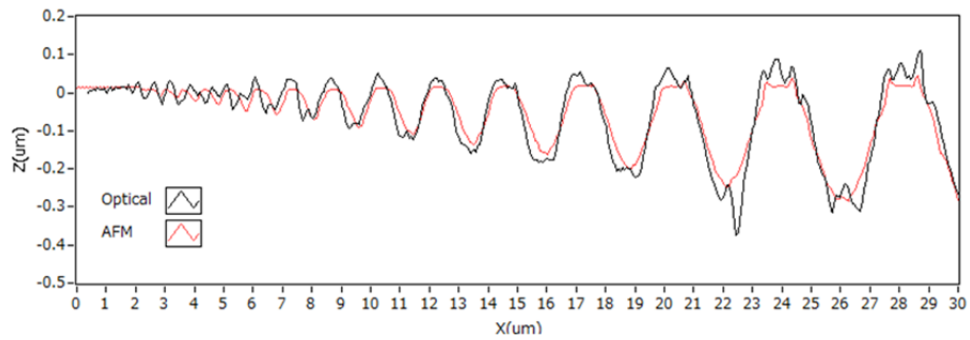
(c) 振幅の応答特性

図 5.13 Instrument B (NA0.55) 標準片 : Type B

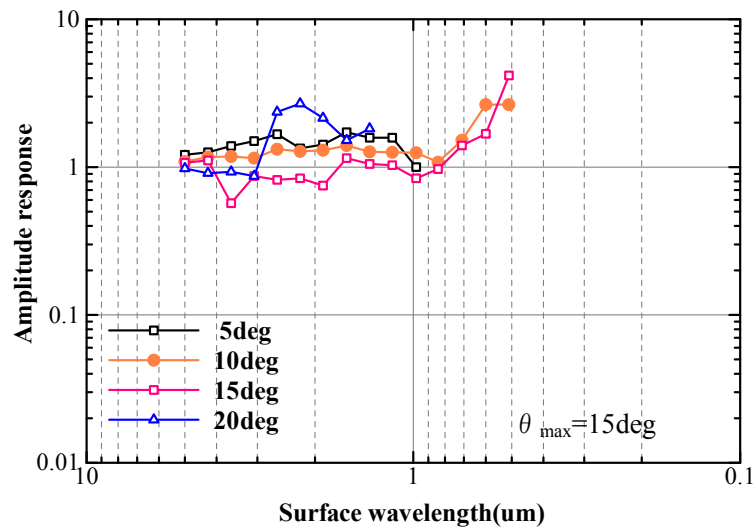
傾斜角 25 度以上で過剰応答気味で結果が不安定になる傾向が見られたので、 θ_{\max} は 20 度と見積もった。



(a)鳥瞰図



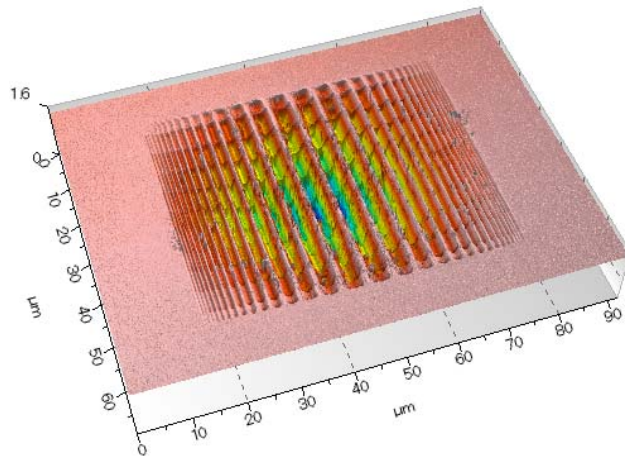
(b) 10度傾斜部の測定断面曲線



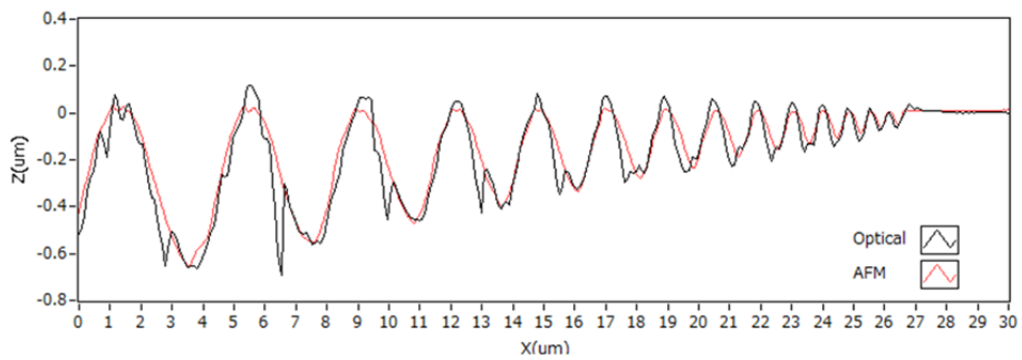
(c) 振幅の応答特性

図 5.14 Instrument C (NA0.80) 標準片 : Type B

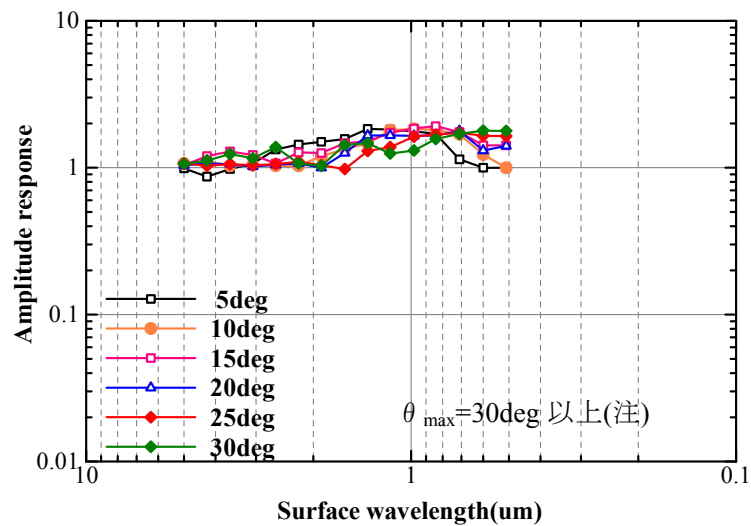
傾斜角 20 度以上で測定結果が不安定となり，表面波長 $1\mu\text{m}$ 以下で異常値が急増する傾向が見られた。



(a) 鳥瞰図



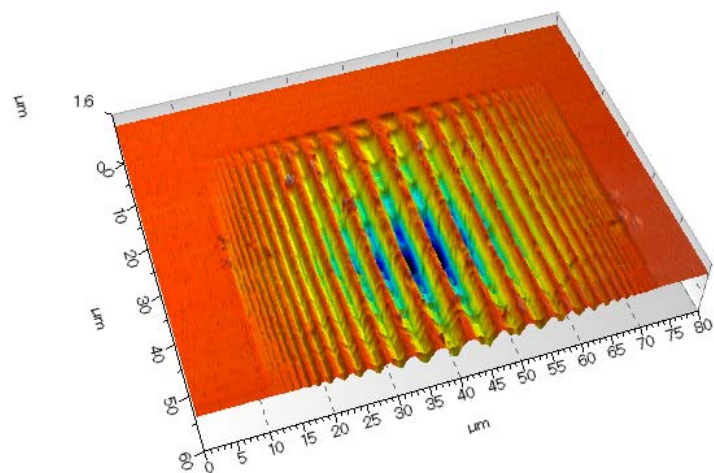
(b) 20 度傾斜部の測定断面曲線



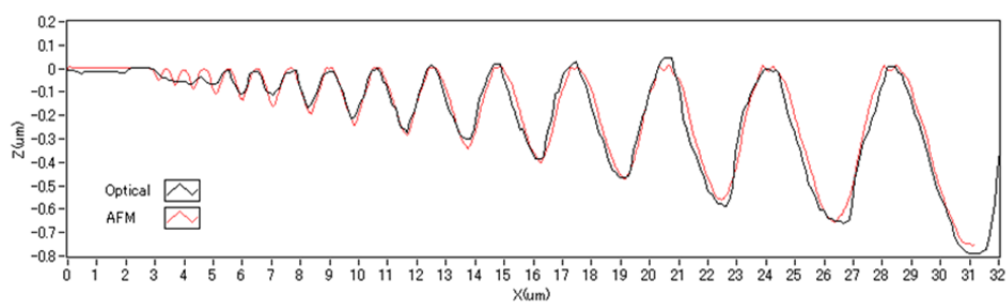
(c) 振幅の応答特性

図 5.15 Instruments D (NA0.95) 標準片：Type B

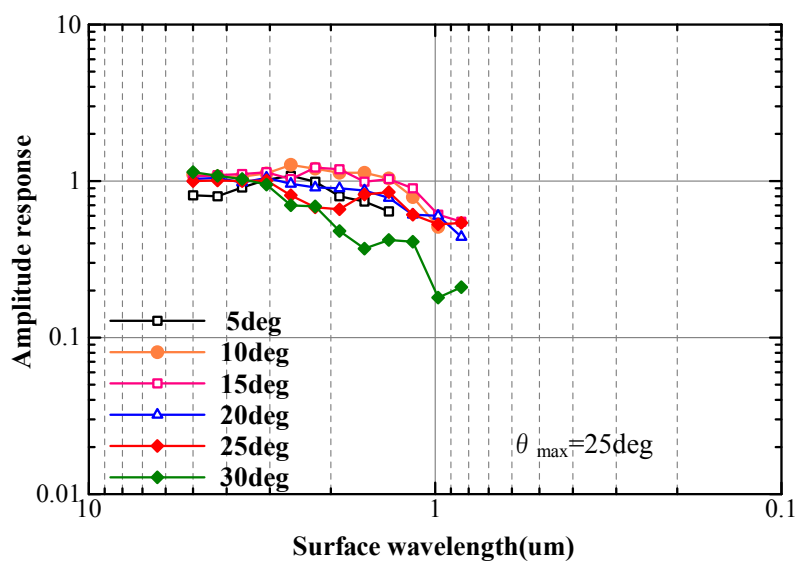
注) 最大傾斜角が 30 度の TypeB の標準片では θ_{\max} を同定できなかった



(a)鳥瞰図

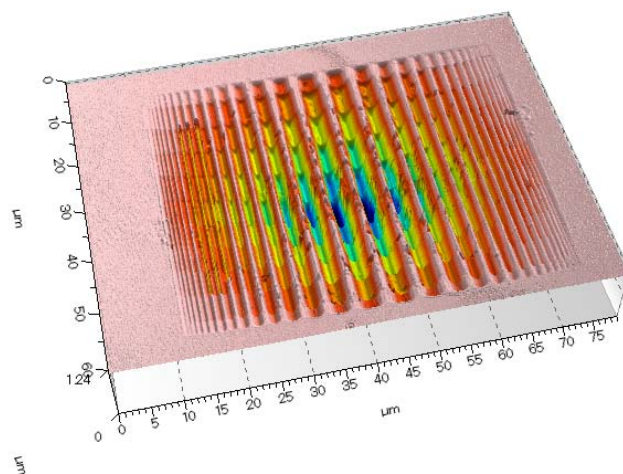


(b) 20度傾斜部の測定断面曲線

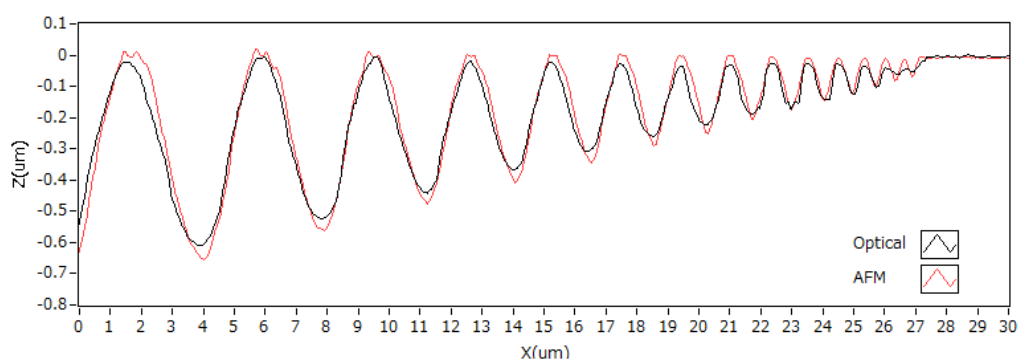


(c) 振幅の応答特性

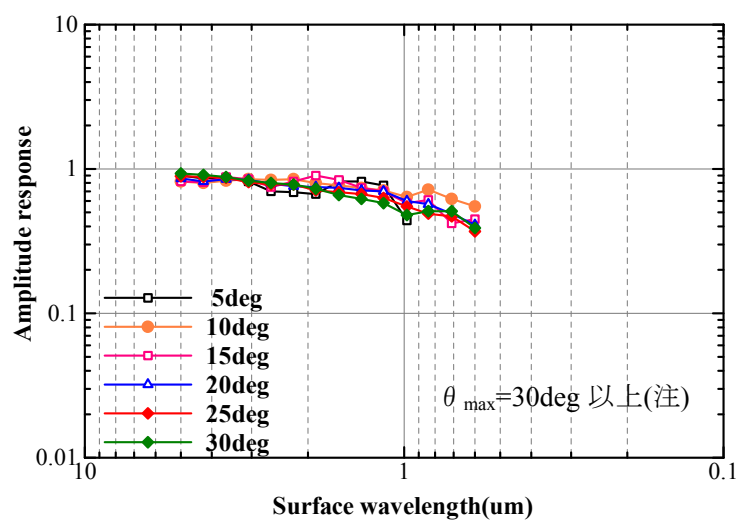
図 5.16 Instruments E (NA0.95) 標準片 : Type B



(a) 鳥瞰図



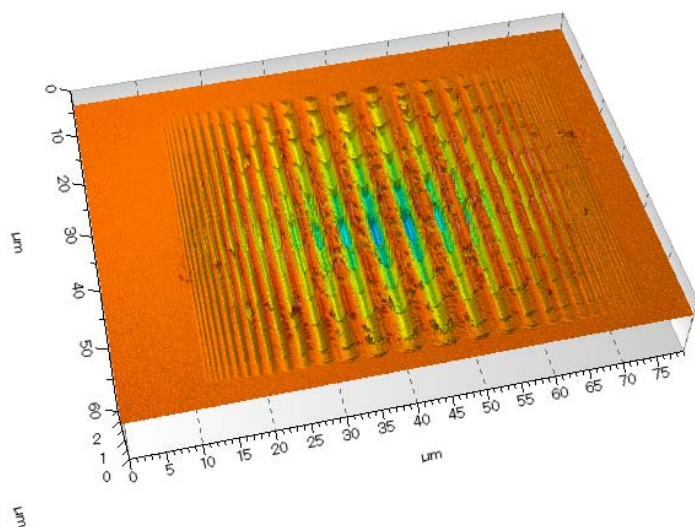
(b) 20 度傾斜部の測定断面曲線



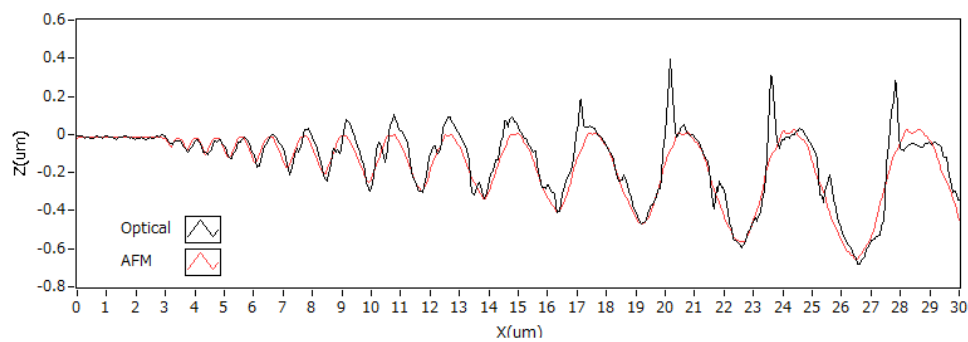
(c) 振幅の応答特性

図 5.17 Instruments F (NA0.80) 標準片 : Type B

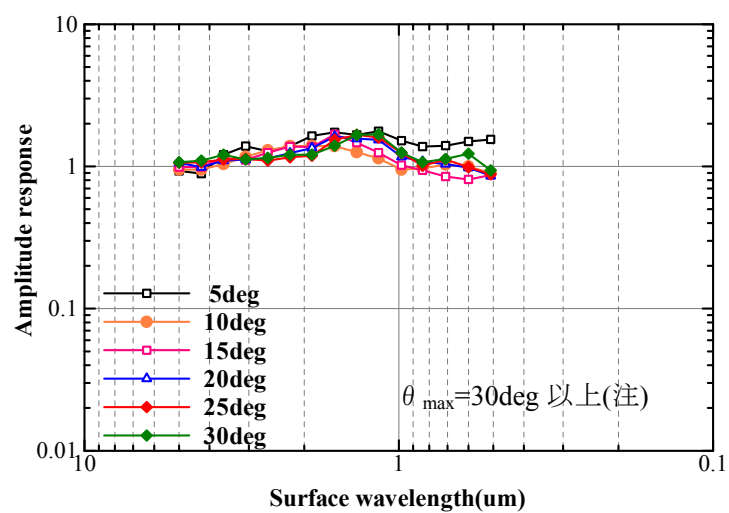
注) 最大傾斜角が 30 度の TypeB の標準片では θ_{\max} を同定できなかった。



(a)鳥瞰図



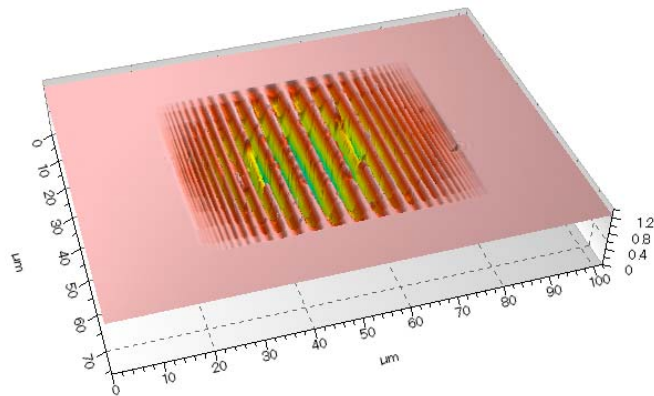
(b) 20 度傾斜部の測定断面曲線



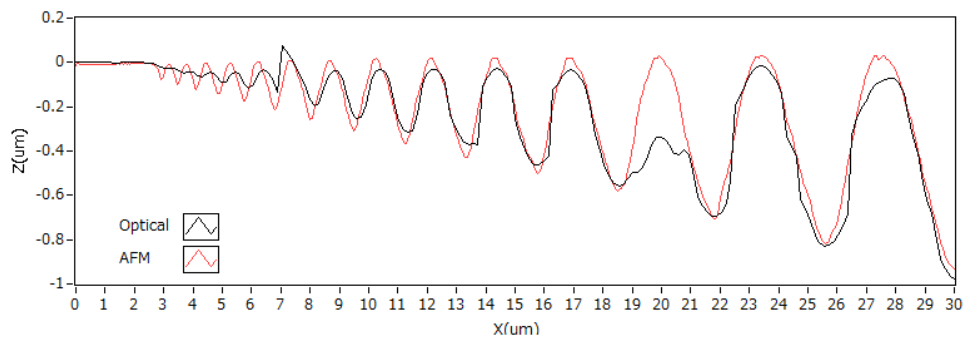
(c) 振幅の応答特性

図 5.18 Instruments G (NA0.80) 標準片 : Type B

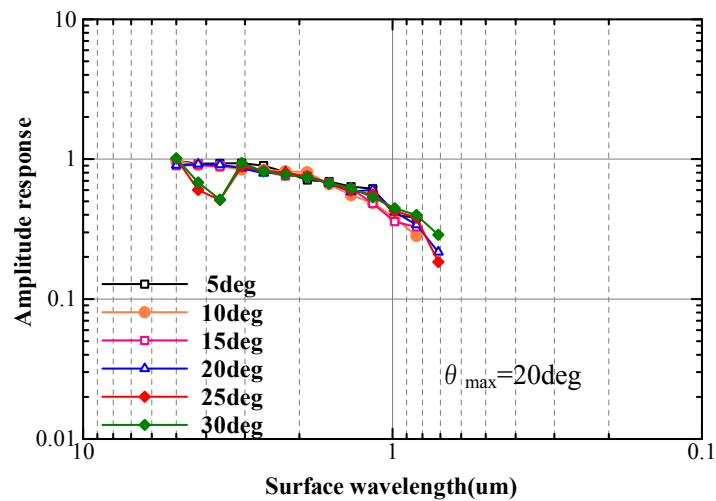
注) 最大傾斜角が 30 度の TypeB の標準片では θ_{\max} を同定できなかった



(a) 鳥瞰図



(b) 25 度傾斜部の測定断面曲線



(c) 振幅の応答特性

図 5.19 Instruments H (NA 不明) 標準片 : Type B

表面波長 $4\mu\text{m}$ 付近の応答挙動はこの測定機の測定原理 (PSI) から想像すると、位相接続(アンラッピング)誤差であると思われる. 25 度の傾斜角以上にて位相接続誤差は発生しやすいことから θ_{max} は 20 度と見積もった.

5.5 空間波長検出限界の検定方法に関する一提案[6]

第 2 章で述べたように異種測定機間のデータを対等に比較するためには解析する波長帯を統一することが重要である。そのためにも各種測定機，測定条件ごとに測定可能な限界波長を定義することが重要である。ISO 規格[7]ではこの限界波長を“Lateral period limit（空間波長検出限界）”と呼びその定義を「正弦波の振幅の応答が 50%に低下する時の表面波長」としている。一方，図 5.11～図 5.19 で示した様々な光学式測定機の応答特性からも分かるように振幅は低下するだけではなく過剰応答（1 以上の応答）となる場合も多く，ISO 規格ではこの過剰応答については言及していない。

過剰応答は第 1 章の図 1.22 で示したような異機種間の測定結果に大きな差異を発生させるものであり，これを考慮した上で空間波長検出限界の検定方法の取り決めを行う事が異機種間の測定データの等価性を追求する上では重要な事柄と考えた。

そこで本節では測定データの等価性を向上させることに主眼を置いた以下の方法で空間波長検出限界の検定方法の一提案を行う。

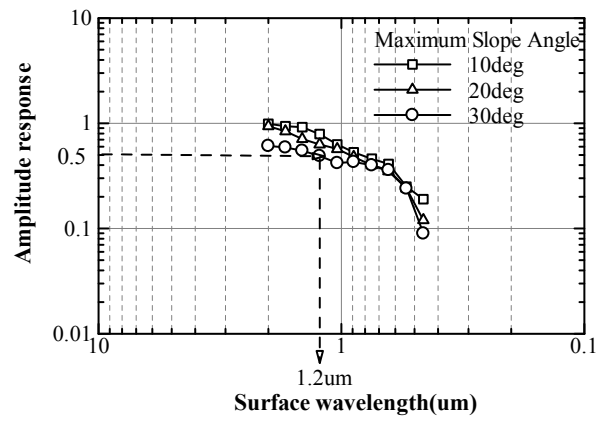
- (1) 振幅の応答に過剰応答が無くなるように Low-Pass-Filter(LPF)処理を行う。
- (2) 過剰応答が無い場合は LPF 処理を行わない。
- (3) (1)(2)で得られた振幅の応答曲線に対してその応答が 50%に低下する波長を空間波長検出限界と定義する。

(1)は異常値を排除してデータの信頼性を向上させるためである。(2)は必要以上のフィルタ処理による情報量の低下を防ぐためである。(3)で 50%とした理由は ISO 規格における空間波長検出限界の定義と統一するためである。

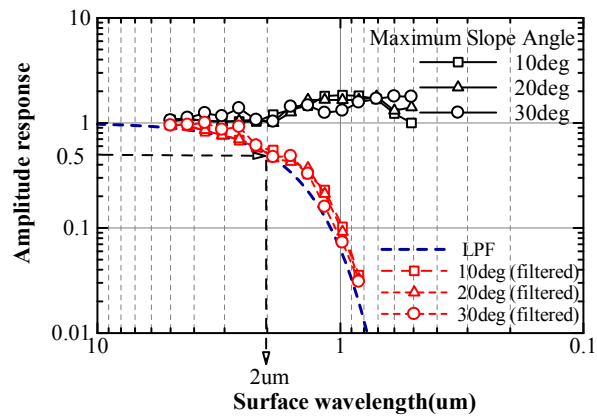
図 5.20 は図 5.11～5.19 で示したような応答曲線の中の 3 つの典型例を示している。たとえば図 5.20 (a)で示した応答特性を持つ測定機では元々過剰応答が無いので LPF 処理無し of データ（黒プロット）に対して応答が 50%となる表面波長 1.2 μ m を空間波長検出限界として検定する。(b)では過剰応答がなくなるように，(c)では短波長域での複雑な応答を単調現象となるように LPF 処理（青破線）を行ったデータ（赤プロット）の応答が 50%になると

きの表面波長を空間波長検出限界とする。(b)の例では 2 μm 、(c)では 0.9 μm である。なお、LPF 処理のカットオフ波長は ISO で定める標準数（例えば 8 μm , 2.5 μm , 0.8 μm 等）から選択する。フィルタの種類はガウシアンフィルタを用いた。

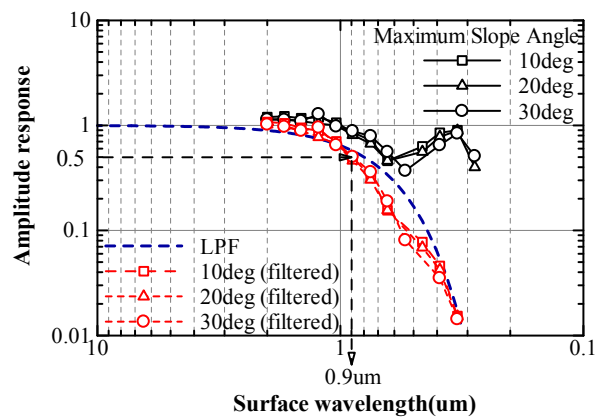
上記で提案した考え方は不確かな波長限界を λ_s フィルタによって除去するという触針式表面性状測定機と同様の考え方である。これにより各種測定機、条件ごとに空間波長検出限界を定義すれば、限界を超えない範囲内で測定機を利用することになるため、データの信頼性の向上効果が期待できる。



(a) 過剰応答の無い場合



(b) 過剰応答がある場合



(c) 短波長域での応答が単調減少でない場合

図 5.20 空間波長検出限界の検定方法に関する一提案

5.6 まとめ

1. 1回の測定で空間波長検出限界および最大局所傾斜角を検定できる新しい標準片 “振幅変調型チャープ波形モデル”を開発した.
2. FIB 加工を用いて実際にこの標準片を製作し, 各種市販測定機の検定用途として利用できることを示した.
3. 各種測定機の表面波長に対する振幅の応答特性から, 異常値を考慮した上での空間波長検出限界の検定方法に関する一提案を行った.

参考文献

- [1] Rubert 社 <http://www.rubert.co.uk/>
- [2] VLSI Standards Inc. <http://www.vlsistandards.com/>
- [3] Richard K Leach, Claudiu L Giusca and Paul Rubert, A single set of material measures for the calibration of areal surface topography measuring instruments: the NPL Areal Bento Box, Metrology and Properties of Engineering Surfaces, 2013: Proc. of the 14th Int. Conf., Taipei, (2013) pp398-405
- [4] ISO 25178-70:2014, Geometrical Product Specifications (GPS) — Surface texture : Areal — Part70; Material measures
- [5] A Fujii, H Suzuki, K Yanagi : Development of measurement standards for verifying functional performance of surface texture measuring instruments, Journal of Physics, Conference Series 311 (2011) 012009
- [6] 藤井章弘, 柳 和久, 光学式の表面性状測定機を対象とした短波長測定限界に関する一考察, 2012 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, F61 (2012) pp.479-480
- [7] ISO 25178-3:2012, Geometrical Product Specifications (GPS) — Surface texture : Areal — Part2; Specification operators

第6章 総括

以下に本研究の結果を各章ごとにまとめ、最後に全体を総括する。

第1章

1. 工業製品の高度化に伴い、製品を構成する部品の表面機能の重要性が高まっていることを述べると共に、国際的な工業規格に従った製造・品質管理の重要性について述べた。
2. 三次元表面性状計測に関する ISO 規格の最新動向を要約し、光学式測定機の抱える測定データの信頼性に対する課題（異機種間の測定結果の差異，異常値への対処）についてまとめた。
3. 課題解決のためには座標系の校正だけではなく、光学プローブと標本表面の相互作用に起因する応答挙動（センシング特性）の解析が必要であることに言及し、本研究の目的を述べた。

第2章

1. 表面波長に対する振幅の応答は測定機や測定条件ごとに独自の特性を示し、このような応答特性の違いが異機種間の測定データの差異となっていることを実験的に確認した。また、短波長域において異常値が出現しやすい傾向があることも明らかにした。
2. 波長帯を統一して解析することにより、異機種間の測定データの等価性が向上することを確認した。
3. 表面波長に対する振幅の応答特性を正しく検定することは測定データの信頼性向上にとって重要であることを述べた。

第3章

1. 強散乱標本に対する走査型レーザ顕微鏡の応答挙動を解析するために電磁場解析法の1つである FDTD 法を用いたベクトルシミュレーション手法を開発した。
2. FDTD 法の基本原理と、偏光のベクトル成分も考慮したベクトル回折理論について述べ、

本シミュレーション手法の詳細について説明した。

3. シミュレーション結果は、走査型レーザ顕微鏡の実測結果に見られる異常値を含む測定結果と良い一致を示すことを確認し、本シミュレーション手法による結果の妥当性を確認することができた。

第4章

1. 光学プローブサイズ内の局所形状に注目して、標本形状を3つの形状要素（傾斜平面，湾曲面，エッジ）に分類し、これら基本形状に対する走査型レーザ顕微鏡の応答挙動を解析した。
2. 新たに開発したベクトルシミュレーション手法によって従来のスカラー理論では解析できなかった走査型レーザ顕微鏡の異常値の発生メカニズムを明らかにした。異常値は本来検出されるべきフォーカス状態での信号が弱く、その結果として相対的に強くなったデフォーカス時の信号を誤検出する場合に多く発生することが分かった。
3. 対物レンズの NA が大きいほど、標本の局所傾斜角が小さいほど、異常値の発生を抑制できることを明らかにした。
4. 空間波長検出限界は光学式測定機の測定能力を示す重要な性能指標であることを示すと共に、これを統一的な解釈のもとで評価する必要性について述べた。
5. 基本形状に対する応答挙動の解析結果、及び異常値の発生メカニズムを踏まえた上で校正、または検定用の測定標準面（標準片）の設計指針についてまとめた。

第5章

1. 1回の測定で空間波長検出限界および最大局所傾斜角を検定できる新しい標準片“振幅変調型チャープ波形モデル”を開発した。
2. FIB加工を用いて実際にこの標準片を製作し、各種市販測定機の検定用途として利用できることを示した。
3. 各種測定機の表面波長に対する振幅の応答特性から、異常値を考慮した上での空間波長検出限界の検定方法に関する一提案を行った。

総 括

本研究は第 1 章に掲げた通り，下記 2 点を目的として研究を行った．

- (1)光学式測定機特有の応答挙動に基づいた校正用標準片の具体形状に関する設計指針をまとめる
- (2)測定データの信頼性に強く影響を与える計測限界の評価方法に関する提案を行う

目的(1)の達成のために，第 3 章において走査型レーザ顕微鏡（LSM）を解析対象としたベクトルシミュレーション手法を開発し，これを用いて第 4 章では LSM の応答挙動の解析と異常値の発生原因について考察した．そしてこの結果を基に ISO25178-part70 の定める光学式表面性状測定機向けの測定標準面（標準片）の具体寸法に関する設計指針についてまとめた．

ここでまとめた設計指針は LSM を対象とした場合に成立するものであって，全ての光学式測定機を包含した指針とは言い切れない．しかしながら，第 4 章でも述べたように LSM の解析結果に見られる異常値は，垂直走査低コヒーレンス干渉法や点合焦輪郭曲線法といった異なる原理の測定機の実測結果に見られるものと共通点も多い．このことから推測すると，本論文でまとめた標準片の設計指針はある程度の一般性があると考えられ，目的(1)に対しては一定の成果を得たと考えている．更なる一般性を高めた設計指針を得るためには他の測定原理，特にデジタルホログラフィ顕微鏡法や位相シフト干渉顕微鏡法などの光の位相情報を主として利用する測定機を解析対象としたベクトルシミュレーションによる検証作業が必要と考える，これに関しては今後の課題と考える．

目的(2)の達成のために，まず第 2 章において様々な測定機による結果の差異が空間波長検出限界の違いによってもたらされることを明らかにした．また，第 4 章におけるベクトルシミュレーションを用いた解析結果からは，最大局所傾斜角が測定の難易度を定める 1 つの指標であることを示した．そこで第 5 章ではこの 2 つの計測限界をそれぞれ検定することが可能な標準片とその評価方法に関する 1 つの提案を行った．この提案の中では計測限界の検定過程で発生した異常値の取り扱い方にも言及した．これは Low-Pass-Filter(LPF)処理を用いるものであるため，測定データの持つ微細形状に関する情報量を低下させてし

まう。しかしこの考え方は不確かな波長限界を λ_s フィルタによって除去するという触針式表面性状測定機と同様の考え方であって、この評価方法の導入によって異機種測定機間のデータの等価性の向上が期待できると考える。

本研究での検討結果が ISO25178 シリーズの規格整備の一助となることを期待する。そして一連の規格群の整備によって安心して測定機を利用するための環境を測定機ユーザに提供し、更なる光学式表面性状測定機の信頼性の向上と普及を願う次第である。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、多大なご支援とご指導を頂いた長岡技術科学大学 柳 和久教授に心より感謝の意を表します。先生には他社測定機メーカーの技術者や国内外の研究者の方々と交流を開始するきっかけも与えて頂きました。このことは一企業人として会社の中だけで活動していた私にとっては大きな刺激となりました。重ね重ねお礼を申し上げます。

副査を引き受けて頂いた長岡技術科学大学 打木久雄教授、伊藤義郎教授、明田川正人教授、および埼玉大学大学院理工学研究科 塩田達俊准教授の各先生方には広い視点から多くの有益なアドバイスを頂きました。心より感謝いたします。

社会人博士課程での研究生活を支えていただきました長岡技術科学大学 田中秀岳助教、吉田昌弘様に心より感謝いたします。

本研究第 5 章における FIB 加工による実標本の製作で多大なご協力を頂きました株式会社エリオニクス 開発設計部 土田智之様、同社 営業部 田口佳男様に心より感謝いたします。

在職中であるにも関わらず、社会人博士課程への入学を快く許可して頂いたオリンパス株式会社 SSBC 製造本部長 鹿角 護様、勤務時間中の私の研究活動に対するご理解を頂いた SSBC 事業推進本部 商品企画部部長 小池 潔様、SSBC 開発本部 開発 6 部部長 阿部勝行様に心より感謝いたします。

博士課程入学の決断の後押しをしてくださったオリンパス株式会社 商品企画部 技術担当部長 藤本洋久様、柳先生との出会いのきっかけを作っていただいた商品企画部 糸嶺裕明様、英語での口頭発表や論文作成の際にご協力を頂いた推進企画部 鈴木 等様、開発 1 部 熊野豊美様に心より感謝いたします。

本研究第 3 章におけるベクトルシミュレーション手法を開発するにあたり、同僚であるオリンパス株式会社 開発 6 部 林真市様、藤井信太郎様、システム開発本部 寺沢智丈様には並々ならぬご協力を頂きました。心より感謝いたします。

最後に、在職中の研究生活を支えて頂きましたオリンパス株式会社のすべての関係者の皆様にお礼を申し上げます。ありがとうございました。

2014 年 6 月

藤井章弘