OUKA
The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	Study on On-Machine Measurement of Micro-Endmill Cutting-Edge Profile using Laser Diffraction Gauge Method
Author(s)	Panart, Khajornrungruang
Citation	大阪大学, 2005, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/2132
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

博士論文

光回折ゲージ法を用いた マイクロ工具切れ刃プロファイルの オンマシン計測に関する研究

Study on On-Machine Measurement of Micro-Endmill Cutting-Edge Profile using Laser Diffraction Gauge Method

大阪大学大学院工学研究科
機械システム工学専攻

Panart Khajornrungruang

2004年 12月

博士論文

光回折ゲージ法を用いた
マイクロ工具切れ刃プロファイルの
オンマシン計測に関する研究

Study on On-Machine Measurement of
Micro-Endmill Cutting-Edge Profile using
Laser Diffraction Gauge Method

大阪大学大学院工学研究科
機械システム工学専攻

Panart Khajornrungruang

2004 年 12 月

Copyright © 2004 by Panart Khajornrungruang

論文審査委員会

大阪大学大学院工学研究科

主査　三好　隆志　教授　機械システム工学専攻

副査　竹内　芳美　教授　電子制御機械工学専攻

副査　高谷　裕浩　助教授　機械システム工学専攻

要　旨

光回折ゲージ法を用いた
マイクロ工具切れ刃プロファイルの
オンマシン計測に関する研究

Panart Khajornrungruang

本研究は光回折を用いた，精密微細切削用マイクロ工具三次元切れ刃プロファイルのオンマシン計測法の開発を目的として行われた．現在の微細切削加工 (マイクロ切削) は，高精度なマシニングセンターなどにおいて極小径工具により行われ，加工精度と生産効率の向上のために，工具切れ刃形状を機上で計測することにより，工具管理（摩耗・欠損）や工具経路の補正ができる技術が望まれている．本論文は，工具切れ刃と基準ナイフエッジ間隙からの回折パターンを測定し，シートレーザビームの走査により工具切れ刃三次元プロファイル計測を可能とする光回折ゲージ法を提案し，数値理論解析および基礎実験による検討を行ない，極小径工具（直径 300 μm）の測定・評価実験から，本測定手法の有効性を実証した．

第1章「緒論」では，本研究の背景，および従来のオンマシン工具計測技術と提案する手法を概観し，本研究の立場を明らかにした．

第2章「理論解析」では，測定分解能や測定誤差を，本手法の基本原理である Fraunhofer 回折理論に基づいて解析した．

第3章「光回折ゲージ法」には，本計測手法である光回折ゲージ法の提案，および試作した切れ刃プロファイル計測システムを紹介した．

第4章「エッジ間隙の測定基礎実験」では，本手法が期待される測定性能の検討を行った．数 nm の分解能で切れ刃プロファイル計測が可能であることを検証した．

第5章「小径工具の切れ刃プロファイル計測」では，直ぐ刃およびねじれ刃の小径エンドミルを試料として切れ刃プロファイル測定実験を行ない，測定結果は SIM 観察像と良く一致しており，提案した光回折ゲージ法の測定精度を検証した．

第6章「極小径工具の摩耗実験」では，ねじれ刃極小径エンドミル（工具径300 μm）の切削摩耗実験を行ない，切削長さの異なる5本の摩耗極小径工具を準備し，その摩耗工具に対するエッジ間隙のステップ測定応答実験から，切れ刃摩耗の検出分解能が0.1 μm以下であることを示した．

第7章「極小径工具の摩耗切れ刃位置検出」では，オンマシン状態を再現した測定を行い，切削前と切削後の工具刃先の違いを示した．シートビームの走査測定結果により，回転振れを含めた切れ刃プロファイルを求め，また工具回転振れを計測し，振れ計測の可能性を示した．

第8章「極小径工具の摩耗切れ刃プロファイル計測」では，第6章で準備した摩耗極小径工具径の刃先後退量を測定し，摩耗形状および切削長さと摩耗の関係を示した．その三次元切れ刃プロファイルの測定結果は，SEM観察像と良く一致していることから，本手法の有効性が実証された．

第9章「結論」では，各章で得られた結論をまとめ，本論文の成果を総括した．

キーワード：極小径工具，切れ刃プロファイル，オンマシン計測，
工具計測，摩耗，超精密加工，光応用計測，光回折

Abstract

Study on On-Machine Measurement of Micro-Endmill Cutting-Edge Profile using Laser Diffraction Gauge Method

Panart Khajornrungruang

Establishment of a supreme tool measurement technology for micro endmills on ultra-precision machining center has been indispensable to success the most precise milling work, such as die/mold and part machining, nowadays. The aim of this study is to develop a new optical measuring technique to evaluate cutting-edge profiles for micro-endmill ($\phi < 500$ μm) with precision of better than 100 nm even though on-machine surroundings.

In first part of this thesis, the "Diffraction Gauge Method" which is based on far-field laser diffraction is proposed. The cutting-edge profile is scaled by the width between the first order maxima in a diffraction pattern, which relates to the spacing of a slit-type aperture formed between a reference knife-edge and a tool cutting-edge. The technique is also applicable for on-machine measurement due to simplicity and long working distance of the optical system. Theoretical analysis reveals the practicability of the technique as on-machine measurement with nanometers measurement resolution that is considerably adequate for evaluating micro endmills. Not only the theoretical analysis, but also the fundamental experiments, which verify a calibration curve, indicate that the obtainable measurement resolution is achieved to be 15 nm though a helical-flute micro endmill with repeatability of tens-nanometer.

Secondly, experimental measurement verifications are carried out on commercial tools such as a straight-flute endmill and a helical-flute endmill. The exper-

imental results show excellent agreement of the cutting-edge profiles, which are measured by the developed experimental apparatus, with an image from scanning ion microscope (SIM). It verifies that the proposed method is efficient to accurately measure cutting-edge profiles.

Thirdly, the cutting-edge profile measurement of a worn micro endmill (ϕ 300 μm; WC tungsten carbide; helical angle 30 degree) , which had operated 4.4 m milling length of side-milling on graphite work material with 40,000 rpm rotational speed, is executed. Accordance of the measured profiles with SEM image performs the accuracy of the measurement technique. Moreover, automated continuous measurement is carried out to explore micro endmill cutting-edge position as on-machine circumstance. The experimental results imply the method practical to measure cutting-edge profiles both new and worn tool cases as an on-machine measurement.

Finally, the tool wear evaluations on different milling length of worn micro endmills are performed to verify the validity of the diffraction gauge method. These five micro endmills had operated side-milling on the same graphite work material as mentioned above, with 0.55 m, 1.1 m, 2.2 m, 3.3 m and 4.4 m milling length. The measured tool diameter reductions (recessions) inform the relationship between increase of tool wears and increase of milling length, which approves with common wear process on tungsten carbide endmills. These results certify that this novel micro endmill on-machine measurement technique can be applied into ultra-precision machining center for expecting the most precision milling work in near future.

Keywords: *Micro Endmill, Cutting–Edge Profile, On–Machine Measurement, Tool Measurement, Wear, Ultra–Precision Machining, Optical Measurement, Laser Diffraction.*

Acknowledgements

This dissertation is the culmination of work which has been carried out during my PhD. Candidate at the Department of Mechanical Engineering and Systems, Graduate School of Engineering, Osaka University, Japan.

First of all, I would like to express my sincere appreciation to my research advisor, Professor Takashi Miyoshi, for his superb guidance and continuous encouragement, which make possible the completion of this thesis. I am also grateful for his patience in giving me the opportunity to do my research and a lot of advices, including those not related to technology. I am much indebted to Professor Yoshimi Takeuchi (Department of Computer-Controlled Mechanical Systems) for his careful review and valuable suggestions to improve the thesis and comments on the results of this research. I am also indebted to Associate Professor Yasuhiro Takaya and Research Associate Satoru Takahashi (presently, Associate Professor of the University of Tokyo) for giving me constructive and fruitful discussions, assistances and encouraging me to succeed this work.

I would like to thank Dr. Takashi Harada and Mr. Genki Matsumoto of Mitsubishi Material Kobe Tools, Mr. Soichiro Isago and Mr. Kiyoshi Kaneda of Makino Milling Machine, and Mr. Takanami of Mitsuboshi Belting, they have helped me with many practical arrangements and knowledges for achieving a number of the experiments and producing this research apparatus.

Many thanks go out to my colleagues of Miyoshi Laboratory, who have made me have a lot of memorable scenes. I would like to thank Dr. Hiroki Shimizu (presently, Research Associate of Tohoku University), Dr. Terutake Hayashi, Dr. Taeho Ha (presently, senior researcher at Korea Institue of Machinery & Materials), Dr. Shuichi Dejima and Dr. Atsushi Taguchi (presently, postdoctoral researcher at Laboratory for Scientific Instrumentation and Engineering, Osaka University) for their remarkable guidance, warm care and great friendship. I also had been exceptional experience working together with Dr. Taguchi on his research related to laser diffraction phenomena, which is a basis of this dissertation. I also extend my gratitude to my classmates: Mr. Takahiro Abe (Epson), Mr. Mitsunori Fujita (Fuji Film), Mr. Masahiro Uekita (Toshiba), Mr. Daisuke Nitta (Kowa), Mr. Yuji Matsui and Mr. Takuro Sonoyama (Sony), and present PhD candidates: Mr. Dongkeon Lee, Mr. Ryusuke Nakajima, Ms. Toshie Yoshioka, Mr. Sang In Eom, and all other present and past colleagues, who I cannot list all of their names, for their great friendship, generous support, helpful assistance, Japanese teaching, smiles and so on.

Furthermore, I gratefully thank to my host family, Omori family who have contributed me warm hospitality and consistent kindness since I was at the

Japanese Language Center for International Students, Tokyo University of Foreign Studies. I also gratefully thank to Itami family who have given me an accommodation and warm care during my visits in Hokkaido. Many helps from Onuma and Tokui families, and Tackey (Minoh FM; 81.6 MHz)'s members have encouraged me since I was in charge of Thai language broadcasting program.

I also had a very good time with my really greatest Thai friends, seniors and juniors during the time of my education in Japan. We played many kinds of sports, football, baseball and ski, cooked and had many Thai food parties, and enjoyed traveling together. All topics can be talked among us. In particularly, I would like to thank Dr. Akarawit Limpiyamitr, only one Thai classmate, who has spent our hard study life together and has helped each other (he helped me mostly). Eventually, I also thank Mr. Sheng Shien Chong (Immigration Authority of Singapore) and all of my Japanese friends for making the university life an unforgettable part of my life.

I consider myself lucky to have many great teachers, friends and environment at both Triam Udom Suksa High School, in Bangkok, and Assumption College Sriracha (ACS), in Chonburi, which are very important for me to realize the meaning of "LABOR OMNIA VINCIT" (Work conquers all things; the ACS Latin motto). They have given me a lot of priceless experiences and memories, not only in academic areas but also in social and cultural skills that have made my life fulfilling.

My doctoral study was financially supported by the Rotary Yoneyama Memorial Foundation (for last two years; special thank to the Rotary Club of Takatsuki-East). I would also like to acknowledge the Japanese Ministry of Education, Science, Sports and Culture, for granting me the scholarship to pursue graduate the degree of Bachelor and Master of Engineering in Japan.

At last but not least, I am greatly delighted to express my hearty thanks to my parents, Mr. Amnart and Mrs. Somnuk, and my brother and sister in Thailand for their deep understanding and invaluable behind-the-scene assistance, granting me a right to make my own decision. Furthermore, I never got the chance to thank, my both now deceased grandmothers who took care of my initial years on this planet. I would also like to express my gratitude to my parent-in-laws (Saksopha press) for an exquisite publishing of the thesis.

Most of all however, I would like to thank the two people who are closet to me, my wife Kanyarat and my son Ninart. Without their love, incredible amount of patience and enthusiastic support this thesis would not been finished.

Panart Khajornrungruang

Osaka, Japan
February 2005

目　次

第1章　緒論 **1**

1.1　本研究の背景 1

1.2　マイクロ工具の切れ刃プロファイル計測技術の現状と問題点 . . . 5

1.2.1　オフライン計測手法 5

1.2.2　オンマシン計測手法 6

1.3　本研究の目的 8

1.4　本論文の構成 9

第2章　理論解析 **13**

2.1　緒言 13

2.2　Fresnel-Kirchhoffの回折公式 14

2.2.1　Helmholtz方程式の導入 14

2.2.2　Helmholtz - Kirchhoffの積分定理 16

2.2.3　Fresnel-Kirchhoffの回折理論 18

2.3　Fraunhofer回折理論 20

2.4　ナイフエッジ間の回折光 25

2.5　光回折パターンによるエッジ間隙測定 30

2.5.1　ナイフエッジ間と1次回折光間の距離 30

2.5.2　測定分解能 32

2.6　エッジのずれによる微小間隙の測定誤差 34

2.7　結言 37

第3章　光回折ゲージ法 **39**

3.1　緒言 39

3.2　光回折ゲージ法の測定原理 40

3.3　測定装置の構築 42

3.3.1　計測システムの構成 42

3.3.2　実験装置 42

3.3.3　投光器によるシート光ビームの特性 44

3.4　結言 49

第4章　エッジ間隙の測定基礎実験　51
4.1　緒言 51
4.2　基礎実験 52
4.2.1　光学系 52
4.2.2　疑似切れ刃の光回折パターン 54
4.3　光回折パターンのデータ処理 58
4.3.1　回折パターンの平滑化（単純移動平均） 58
4.3.2　1次光間隔のデータ処理 59
4.4　切れ刃先端位置測定分解能の検証 61
4.4.1　疑似工具直ぐ刃における測定分解能 61
4.4.2　小径工具ねじれ刃における測定分解能 61
4.4.3　繰返し精度 61
4.5　10 μm近傍のエッジ間隙測定可能性の検討 63
4.6　結言 65

第5章　小径工具の切れ刃プロファイル計測　67
5.1　緒言 67
5.2　実験方法 68
5.3　直ぐ刃小径工具の測定 70
5.3.1　測定手順 70
5.3.2　測定結果 70
5.3.3　測定精度の検証 70
5.4　ねじれ刃小径工具の測定 73
5.4.1　測定手順 73
5.4.2　測定結果 73
5.4.3　測定精度の検証 73
5.5　結言 75

第6章　極小径工具の摩耗実験　77
6.1　緒言 77
6.2　摩耗実験 78
6.2.1　実験方法 78
6.2.2　摩耗極小径工具の試料 82
6.3　切れ刃摩耗の検出分解能 84
6.4　結言 86

第7章　極小径工具の摩耗切れ刃位置検出　87
7.1　緒言 87
7.2　摩耗切れ刃の測定精度に及ぼす影響 88

7.2.1 回折パターンへの影響 88
7.2.2 エッジ間隙への影響 91
7.3 切れ刃位置の自動検出 93
7.3.1 工具回転の電動化 93
7.3.2 測定方法 96
7.3.3 測定結果 98
7.4 結言 105

第8章 極小径工具の摩耗切れ刃プロファイル計測 107
8.1 緒言 107
8.2 摩耗工具の切れ刃後退摩耗量 108
8.2.1 摩耗工具の直径変化 108
8.2.2 切れ刃後退摩耗量と切削長さの関係 113
8.3 摩耗切れ刃プロファイル 115
8.3.1 測定手順 115
8.3.2 測定結果 117
8.4 結言 124

第9章 結論 125

付 録A 仕様 131
A.1 System part specifications 131
A.1.1 Laser source 131
A.1.2 Transmission stages 133
A.1.3 Linear CCD 134
A.2 Rotation stage 135
A.2.1 Motor unit 136
A.3 Microscope 138
A.3.1 SEM: Scanning Electron Microscope 138
A.3.2 SIM: Scanning Ion Microscope 138

参考文献 139

関連発表論文 143

表 目 次

2.1 The first five maxima of the function $f(\beta) = \left(\frac{\sin\beta}{\beta}\right)^2$ 28

3.1 Specification of beam scan. 48

6.1 Micro endmill specifications. 79
6.2 Cutting conditions. 80

A.1 Specification of LD element. 131
A.2 Specification of LD drive device. 132
A.3 Specification of laser diode floodlight. (Construction of sheet laser beam.) 132
A.4 Specification of stepping motor controller. 133
A.5 Specification of super tremor x axis stage. 133
A.6 Specification of CCD line sensor. 134
A.7 Specification of roller stage. 135
A.8 Specification of stepping motor. 136
A.9 SEM's main specification. 138
A.10 SIM's main specification. 138

図 目 次

1.1 Illustration of milling process at cutting region by an end-mill. . . 3
1.2 Aim of this study. 3
1.3 Organization of this thesis. 11

2.1 Derivation of the Helmholtz - Kirchhoff integral theorem: region of integration. 17
2.2 Illustrating the derivation of the Fresnel - Kirchhoff diffraction formula. 19
2.3 Diffraction at an aperture. 23
2.4 Fourier transformation lens system. 23
2.5 Illustration of fraunhofer diffraction of an edge spacing. 26
2.6 Fraunhofer diffraction at an edge spacing . The function $\left(\frac{\sin\beta}{\beta}\right)^2$. 26
2.7 The points of intersection of the curves $f(\beta) = \tan\beta$ with the straight line $f(\beta) = \beta$ are the solutions of subsidiary maxima. . . 28
2.8 Diffraction intensity distribution (Diffraction pattern) at focal plane. 29
2.9 Fraunhofer diffraction of an edge spacing. The edge spacing x can be obtained by measuring the width between 1^{st} order maxima W. 31
2.10 Relationship between the spacing x and the width W. 33
2.11 Resolution of measurement at various edge spacings to be set up. 33
2.12 Diffraction pattern with edge deviation Δz corresponding to the modified path difference. 35
2.13 Measurement errors Δx of edge spacing caused by edge deviation Δz ; $\Delta x = x(W') - x$. 35

3.1 Schematic of diffraction gauge method. 41
3.2 Experimental setup of tool edge profile measurement using diffraction gauge method. 43
3.3 Measurement of illuminating sheet laser beam by beam scan. . . . 45
3.4 Illuminating sheet beam nearby beamwaist. 45
3.5 Spread of illuminating sheet laser beam (from top view). 46
3.6 Detection of intensity distribution at sheet beam waist. 46
3.7 Laser intensity distribution at sheet beam waist. 47

3.8 Smoothed laser intensity distribution at sheet beam waist. 47
3.9 Enlarged intensity distribution of sheet beam, which would be illimunated into edge spacing. 48

4.1 Optical system for fundamental experiment. 53
4.2 Illustration of the top view section on illuminated position to a quasi tool cutting edge. 53
4.3 Diffraction pattern at focal plane from linear CCD. 55
4.4 Smoothed diffraction pattern. 55
4.5 Changes of diffraction patterns detected when cutting edge to knife edge spacing x is from 120 μm to 20 μm. 57
4.6 The principle of 7-point smoothing by moving average fitting. . . 58
4.7 Detected diffraction pattern for obtaining the width W. 60
4.8 Measurement of the measurand width W and their measured value repeatabilities corresponding to the edge spacing x. 62
4.9 Width between 1^{st} order maxima W when edge spacings are around $x = 10$ μm with 11 times average and their repeatability intervals (2SD). 64

5.1 Experimental procedures of tool cutting-edge profile measurement. 69
5.2 Profile measurement results of a straight flute slotting endmill, in L and R regions. 71
5.3 Details of the measured profile comparison with SIM image. . . . 72
5.4 Detected diffraction pattern in measurement of a helical endmill. 74
5.5 Profile measurement results of a helical flute endmill. 74

6.1 Dimensions of micro endmills used in worn experiment. 79
6.2 Illustration of side-milling in worn experiment. 80
6.3 Cutting appearance. 81
6.4 Photographs of micro endmills after cutting. 83
6.5 Measurement result of 500 nanostep response. 85

7.1 New tool before cutting. 89
7.2 Worn tool after cutting. 89
7.3 Detected diffraction pattern on new tool. 90
7.4 Detected diffraction pattern on worn tool. 90
7.5 Linearity of measurement for new tool. 92
7.6 Linearity of measurement for large worn tool. 92
7.7 Appending a motor to the roller stage with belt transmission. . . 94
7.8 Views of developed apparatus with motorized roller stage. 95

7.9 Top view of diffraction gauge among automated measurement. . . 97
7.10 Two valleys show position of cutting edges (a), (b); comparison of measured edge spacing between new tool and worn tool(b). . . 99
7.11 Automated measurement result. 101
7.12 Automated measurement results with rotation runout. 104
7.13 Tool rotation runout analysis. 104

8.1 Measured tool diameter on micro endmill with 0.55 m cutting length. 110
8.2 1.10 m cutting length. 110
8.3 2.20 m cutting length. 111
8.4 3.30 m cutting length. 111
8.5 4.40 m cutting length. 112
8.6 Relationship between tool diameter recession and cutting length. . 114
8.7 Measurement procedure for micro endmill cutting-edge profiles. . 116
8.8 Measured cutting-edge profiles in 2 dimensions. 118
8.9 Micro endmill cutting-edge measured profiles. 119
8.10 Measured profiles at rotation of 0 deg. 120
8.11 30 deg. 120
8.12 60 deg. 121
8.13 120 deg. 121
8.14 Measured profiles comparison with SEM image. 122
8.15 Zoom in of measured results certify the validity of measurement. . 123

A.1 Roller stage dimensions. 135
A.2 Motor dimensions. 137
A.3 Driver dimensions. 137
A.4 Torque at various rotational speed. 137

第1章　緒論

LABOR OMNIA VINCIT

"Work conquers all things."

1.1　本研究の背景

時代が進むにつれてより微細で高度な加工技術が開発されていく．これは最終製品の要求仕様がより微細な加工によって初めて満たされるものとなっていくことを意味している．つまり，様々な機器や構成要素部品の要求仕様は軽薄短小の傾向にあり，そこでは要素部品の外形寸法そのものではなく，機能を考慮するべきである．こうした要求仕様の変化の方向の主なものとして次の3点が挙げられる[1],[2]．

1. 機器機能の高密度化：住居空間や，人間の操作できる物体の重量や寸法には限界があるので，より高度な機能を求めれば求めるほど機器の高密度化が要求される．すなわち，一定容積内に積載される機能は増大を続けている．そのためには，設計上，必要素子数が少なくて済むような改善が加えられてはいるが，各素子自体の小型化が決定的な役割を果たすことには疑う余地がない．したがって，より微細な加工が要求される傾向は将来に向かっても確実なものと言える．

2. 機器機能の高速化：同じ仕事をするなら速ければ速いほどよい．運動方向や回転状態を素早く切り替えるには寸法の小さい方が有利なわけで，高速動作を必要とする機器の要素部品は小型である方が良好な性能を得やすいことになる．

3. 機器機能対象物範囲のより微細なものへの拡大：例えば，生体に関係する対象物である．手術などで対象とする部分は，手足から始まり，筋肉，内臓などと進み，さらに皮膚，角膜などを扱うようになった．こうした対象物範囲の拡大要求が，微細加工の必要性を高める一つの要因となってくる．

以上のほかに，省エネルギー，省資源といった観点からも機器の小型化は望ましい方向であり，それを支える微細加工の技術はますますその必要性が高まることが予想される．

ところで，微細加工を行なうには加工範囲を狭い領域に限定する．そのためには次の2点が重要となる．

1. 加工単位が小さいこと：加工単位とは，一回の加工現象により除去（または付加）される材料の体積(または面積，長さ)のことである．これが十分小さくないと微細加工は実現できない．また，超精密な微細加工を行なうとなれば，さらに加工単位が小さくなければならないことは明らかである．

2. 加工装置の精度が高いこと：上述と同様に微細加工を行なうためにはより高精密な装置で加工を行なう必要がある．

上述の2点を満足する加工方法であれば原則として微細加工への適用が可能であり，切削，研削をはじめ，極めて多数の加工法が実際に微細加工に用いられている．その中で切削加工による微細加工の特徴[3]-[5]は，非常に高い寸法精度・形状精度・表面粗さを容易に得られること，複雑な形状を自在に作り出せること，加工材料をほぼ自由に選べること，にあるといえる．精度よく管理された切れ刃形状をもつ工具を正確に運動させることによって，工具切れ刃の形状を工作物に正しく転写できるからである．このように切削工具を用いる機械加工により，工具形状を転写して3次元の微細形状をもった機能表面を形成することが可能な回転工具であるエンドミル(End-mill)などが通常挙げられる．また，以上に述べるように，加工単位が小さな極小径工具（工具径1 mm以下）は仕上げ加工に欠かせなくなった．その加工の様子は図1.3に示す．

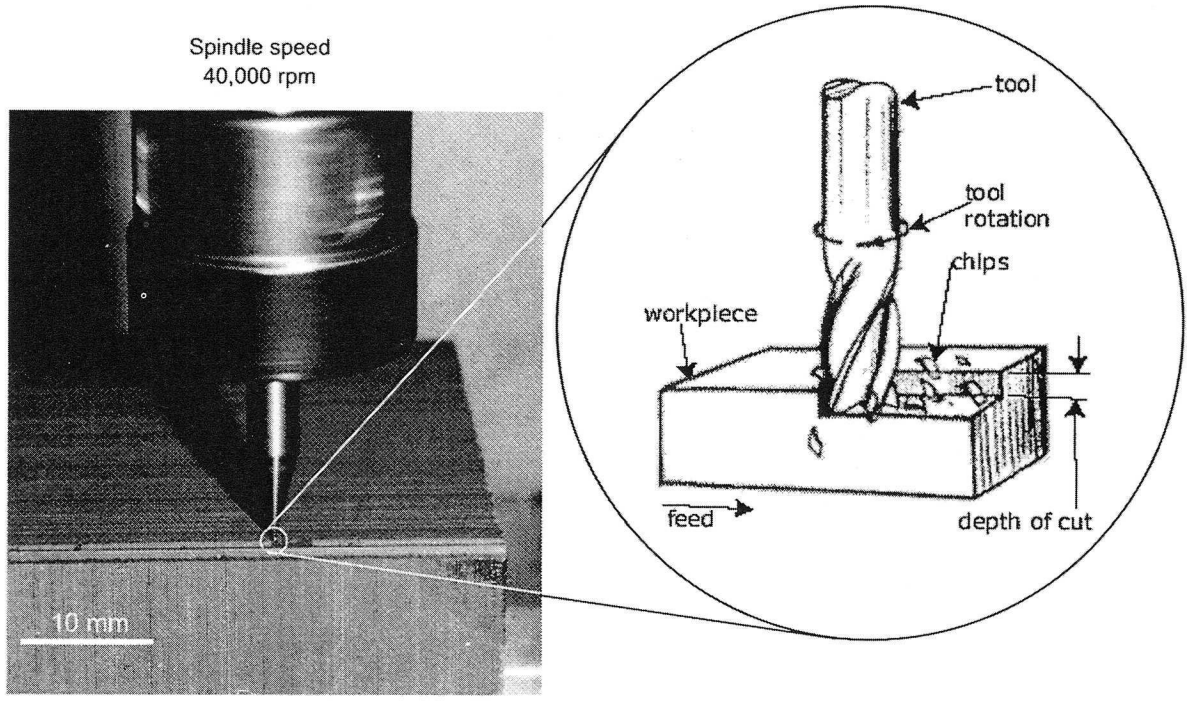


Fig. 1.1 Illustration of milling process at cutting region by an end-mill[6].

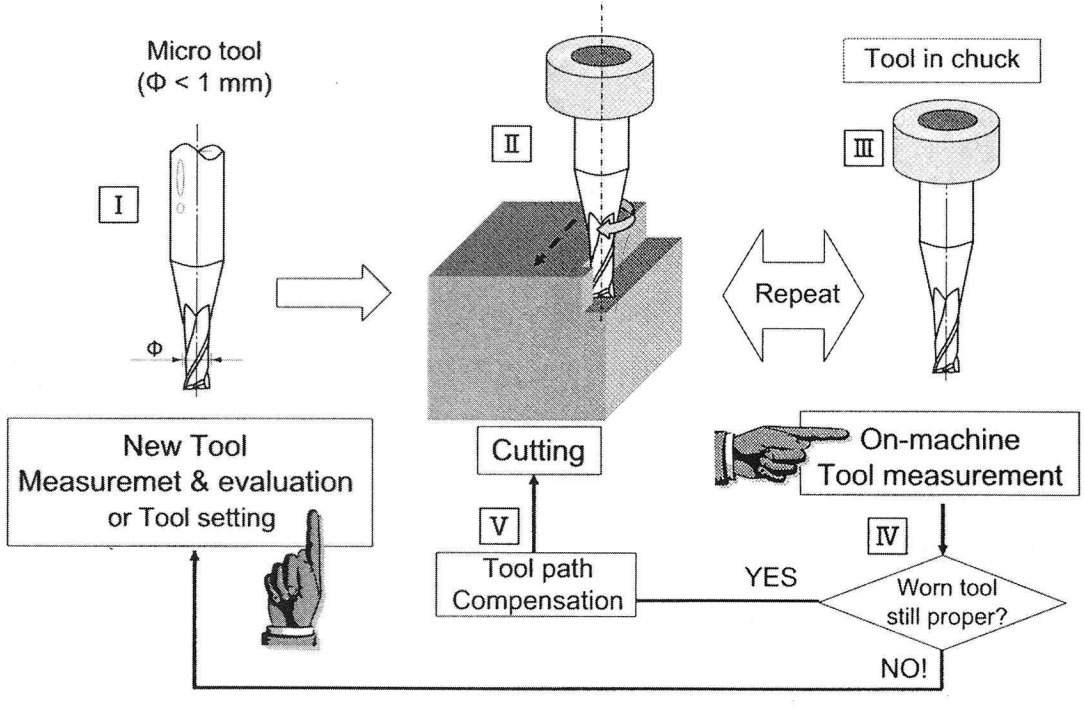


Fig. 1.2 Aim of this study.

このような現状の中，質の高い切削工具を安定して供給するためには，設計，加工，検査などの各工程から構成される生産システム全体の高精度化，高速化，自動化，省力化などが必要不可欠である．その工程の中で工具の製作プロセス中では特に切削加工に最も重要な切れ刃プロファイルの高精度な測定・評価は依然として手間と時間のかかる工程として問題視されている．しかし，現在では極小径工具を加工機の環境において計測する技術はまだ開発されておらず，実際に製造された新品の極小径工具の切れ刃形状すら把握できない現状である（図1.2(Ⅰ)）．

また，機能表面を形成する過程では工具管理は欠かせない．従来の工具管理はその加工時間(距離)により行なわれるため，工具に及ぼす熱や応力の影響で起こる工具の切れ刃の変形や摩耗がどのように分布(プロファイル)しているかは考慮されていない．しかし，局所的に摩耗した切れ刃プロファイルと全体的に摩耗した切れ刃プロファイルでは，工具の有効利用の観点からその性質は異なるため，工具の寿命判定などにおいては摩耗した切れ刃プロファイルを計測する必要がある．また切れ刃プロファイルは加工誤差や加工面粗さに大きな影響を与えるため各切れ刃位置での摩耗量を把握しておくことは非常に重要である(図1.2(Ⅳ))．それらのマイクロ工具の切れ刃プロファイルが把握できれば加工誤差を考慮した工具経路生成（図1.2(Ⅴ)）や，5軸制御加工において摩耗を考慮に入れた工具姿勢決定など（図1.2(Ⅱ，Ⅲ)の繰り返し）による工具寿命の延長，加工精度の向上といった効果が期待できる[7]-[10]．

さらに，工具をいったん加工機から外して，切れ刃プロファイルを測定し，その後に修正加工を行なうには，工具を再現性よくチャッキング(Chucking)する必要がある．現状ではマイクロメートル以下のチャッキング精度を確保することはきわめて難しい[11],[12]．結局，生産現場で加工面の寸法誤差、形状誤差および仕上げ面粗さがともに1 μm以下となる高精度な加工を達成するためには，工具切れ刃形状，主軸の回転振れおよびホルダにおいては工具取り付け時の偏心が，それぞれサブマイクロメートルのレベルにあることが重要とされる[13]．それらの

ために，加工機上，いわゆるオンマシン†において，サブマイクロメートル（0.1 μm）以下の高精度な工具切れ刃プロファイル計測技術が必須である．

以上，ますます微細な，高精度な切削加工が求められているなか，さらなる工具そのものの小径化・高精度化が重要な要素となってきている．そのためには，極小径工具そのものの測定・評価は依然として手間と時間のかかる工程であり，その問題の解決可能な新しい高精度計測技術の確立が必要不可欠である．また，オンマシンにおいてマイクロ工具の切れ刃プロファイルの把握ができれば，より有効な工具管理，より高精度な切削加工が実現可能となる．

1.2 マイクロ工具の切れ刃プロファイル計測技術の現状と問題点

本論文で対象としている極小径工具の切れ刃プロファイル計測を行うことを目的とした従来の測定法の特徴と性能を高精度な非接触・高速でオンマシンへの可能性という点から，まとめて以下に述べる[8], [14]–[20]．

1.2.1 オフライン計測手法

主に顕微鏡などによる観察手法である．これらの手法では，工具をいったんチャックから外して，計測に適切な環境において工具を測定する．測定環境において大きく分けて，以下の二通りになる．

(i) **一般顕微鏡** この測定手法の場合では，測定が容易で工具サイズの制限がなく，それに測定機器が安価であるが，幾何光学を利用することで，作動距離（焦点深度）が短く，測定分解能は光の波長およそ1 μmが限界であって測定精度は数μmとなり，極小径工具計測に対して十分な測定精度が得られない．

† オンマシン計測は，加工機械と計測装置またはセンサーの場所的な一体化であり，加工機上において計測を行なうことである[2]．

(ii) **走査型顕微鏡** まず，共焦点光学系を用いた“走査型レーザ顕微鏡”などについは，上述の光学顕微鏡と比べて，焦点のあった範囲でコントラストの良い画像が観察できる．また，光学顕微鏡と同じように焦点深度が浅いが，各焦点深度の画像を組み合わせると，被測定試料前面において焦点のあった画像が得られる．しかし，この手法では上下の分解能は数十 nm であるが，横分解能は一般顕微鏡と同じであり，極小径工具切れ刃状態を高精度で測定を行なうには，工具の軸方向を顕微鏡光学系の上下方向において測定するため，計測が困難となる．

次に，焦点深度の深い，“走査電子顕微鏡（SEM）”や“走査イオン顕微鏡（SIM）”などの測定[‡]では，高分解能（数 nm レベル）と高い信頼性をもつが，計測環境は真空状態であるため，手間と時間のかかる手法となる．

以上の計測手法では，大きな工具から小さな極小径工具までの工具にとって計測可能であるが，現場での使用可能な光学的顕微鏡では，十分な測定精度が得られない．また，高精度な計測手法では，計測環境といった点から，手間と時間のかかる計測手法であり，現場における計測手法に適さない．さらに，測定するために工具をチャックから外さなければならないので，工具の取り付け再現性が求められなく，極小径工具加工における領域で，計測した後の工具経路の補正には無理がある．

1.2.2 オンマシン計測手法

以下の開発されてきた計測技術は，オンマシンに適用できるような，被測定工具に非接触かつ高速な計測手法である．しかし，極小径工具レベルにおける測定が不可能であり，また，測定精度が数 μm 程度で十分な精度が及ばないことと，切れ刃形状の計測が不可能であることを以下のようにまとめる．

(i) **従来の光計測** 光計測では非接触測定手法であるため，高速な計測が可能となることから，オンマシンにおいて小径工具（ϕ 1 mm 以上）を対象と

[‡] Scanning Electron Microscope および Scanning Ion Microscope の略であり，高分解能と高信頼性といった点から，本研究手法により測定した結果と比較を行なうための手段である．

して計測が可能であるが，測定精度は数 μm 程度と小径工具の切れ刃形状計測には十分な値とは言えない．

- 光切断法：遮断された陰を測定対照する手法で，最も一般的に使われている手法であり，大きく分けて以下の二通りである．
  - 走査型：作動距離が若干長い．工具径，工具回転振れなどを計測が可能となるが，光回折の影響で測定精度は数 μm である．
  - 微小焦点型：レーザビームの焦点にあわせることで，工具形状の測定が可能であるが，ビーム径（数 μm）程度の測定分解能しか求められなく，また作動距離が短い．
- レーザ変位計を用いたオンマシン工具損耗の自動計測：レーザを回転中の工具に照射し，回転工具の変位から刃先の損耗を計測する手法であり，直径が数十 mm 以上のエンドミルを測定でき，分解能は数十 μm である．
- 光学式工具外周刃の逃げ面摩耗測定：CCD カメラによる工具切れ刃の観察に基づいて画像処理を行ない，摩耗を測定する手法であり，画素数と光学系により，測定分解能は数十 μm である．

(ii) **切削力類似の間接的測定**　工具が摩耗することによって切削力や加工機の回転トルクにかかる電圧電流の変化から，切れ刃摩耗を推定することがよく知られている．これらの手法は切削中でも，損耗が推定可能である特徴をもち，明らかにオンマシン計測に適用できるが，小さな極小径工具では，その切削力が極めて小さくなるため，計測が不可能となる．

1.3 本研究の目的

本研究では極小径工具に対してオンマシン計測に適用可能な新しい計測手法の開発を目的としている．この計測法に要求される条件として以下のものが挙げられる．

1. 非接触で工具に傷をつけない．
2. 製品の要求精度から，測定分解能としてサブマイクロメートル (0.1 μm 以下[§]) の分解能が必要である．
3. 一度の測定評価に要する計算コストが安く高速化に対応できる．
4. 測定時間が短く高速化に対応できる．
5. 工具管理（工具寿命や切削経路の補正) の効率を上げるため，加工機上での測定が必要であり，工具が回転している状態で計測が可能であり，摩耗量の状態が把握できる．

以上のことを考慮して，本研究では次のような手法を提案する．測定対象となる工具切れ刃に対し，ナイフエッジを近接させ微小エッジ間隙をつくり，その間隙にレーザビームを照射して生じる回折パターンに基づいて，工具切れ刃プロファイルを計測するものである．以下に本手法の特徴を述べる．

1. レーザ光を用いた光の回折像を用いることで，非接触な測定法であり，高速の計測が可能である．
2. 工具の検査工程では，工具を切断する必要なく，高速に工具全体の切れ刃プロファイルを計測できる．
3. 回折パターンは光学的フーリエ変換理論に基づいて生成され，ナノメートルオーダーの微小な工具切れ刃－ナイフエッジ間隙変化に敏感である．そ

§ 極小径工具におけるマイクロ切削加工では，被削材結晶粒径の転位（Dislocation）や偏折介在物（Segregation）あるいは空孔（Void）が切削現象に直接関与するため，工具切れ刃プロファイルが 0.1 μm レベルの精度で測定されれば，十分だと考えられる [21].

のため，回折パターン分布から適切な情報を抽出することで，サブマイクロメートル（0.1 μm）以下の分解能で切れ刃プロファイルを計測できる可能性がある．

4. 光のもつ情報運搬を利用した計測法であり，工具が回転中にその回転速度に合わせた照射レーザのスキャン範囲内の切れ刃プロファイルを一度に高速に得ることができる．したがって，加工の際に極小径工具に及ぼす応力や熱的影響で起こす切れ刃の変形や摩耗を測定することが可能になり，有効な工具管理およびオンマシン計測への適用ができる．

1.4 本論文の構成

以下の章で，このような特徴をもつ本手法の有効性を議論していく．ここで簡単に本論文の概要を述べる．

第2章『理論解析』では，本論文で提案する測定法，および本手法の基本原理であるFraunhofer回折理論，理論解析による測定分解能についてまとめる．

第3章『光回折ゲージ法』では，第2章で述べたエッジの微小間隙測定を利用して，本測定手法である光回折ゲージ法を提案する．それに基づいて試作した計測システムを紹介し，光回折ゲージに照射するシートレーザビームの特性を述べる．

第4章『エッジ間隙の測定基礎実験』では，まず，回折光強度分布(回折パターン)観測結果ならびに，測定スケール対象となる回折パターンの1次回折光間の距離の検出法を述べる．次に，理論解析に基づいた測定分解能の可能性については，疑似工具やねじれ刃の小径エンドミルを用いた基礎測定実験を行なって検討する．

第5章『小径工具の切れ刃プロファイル計測』では，走査型イオン顕微鏡（SIM）観察像との比較ができるような直ぐ刃小径エンドミルを試料として切れ刃プロファイル測定実験を行ない，提案手法に基づいて試作した計測システムの測定精度を検証する．また，ねじれ刃である一般の小径エンドミル切れ刃プロファイ

ルの測定実験を試みた結果について述べる．

第6章『極小径工具の摩耗実験』では，本手法が対象とする極小径のねじれ刃エンドミルを切削試料として摩耗実験を行ない，摩耗した極小径工具を準備する．また，摩耗工具に対するエッジ間隙のステップ測定応答実験から，切れ刃摩耗の検出分解能の検討について述べる．

第7章『極小径工具の摩耗切れ刃位置検出』では，オンマシン状態を再現して工具を回転させながらエッジ間隙の測定を行ない，工具切れ刃の刃先位置計測を試み，切削前および切削後の工具刃先の違いを示す．また，シートレーザビームの走査測定を行なった結果から，切れ刃位置マップを作成し，回転振れを含めた切れ刃プロファイルを表す．さらに，測定した結果から回転系における工具回転振れを計測し，振れ計測の有効性を示す．

第8章『極小径工具の摩耗切れ刃プロファイル計測』では，切削長さの異なる摩耗極小径エンドミルの工具径を測定し，切削長さと工具径の後退量との関係を示す．次に，切削長さが最も大きな工具の三次元切れ刃プロファイルを測定し，走査型電子顕微（SEM）鏡観察像との比較を行ない，提案手法の高精度計測法であることを示唆する．

第9章『結論』では，本手法の可能性について検討・検証した，理論解析・実験結果を行なった結果から得られた知見をまとめる．

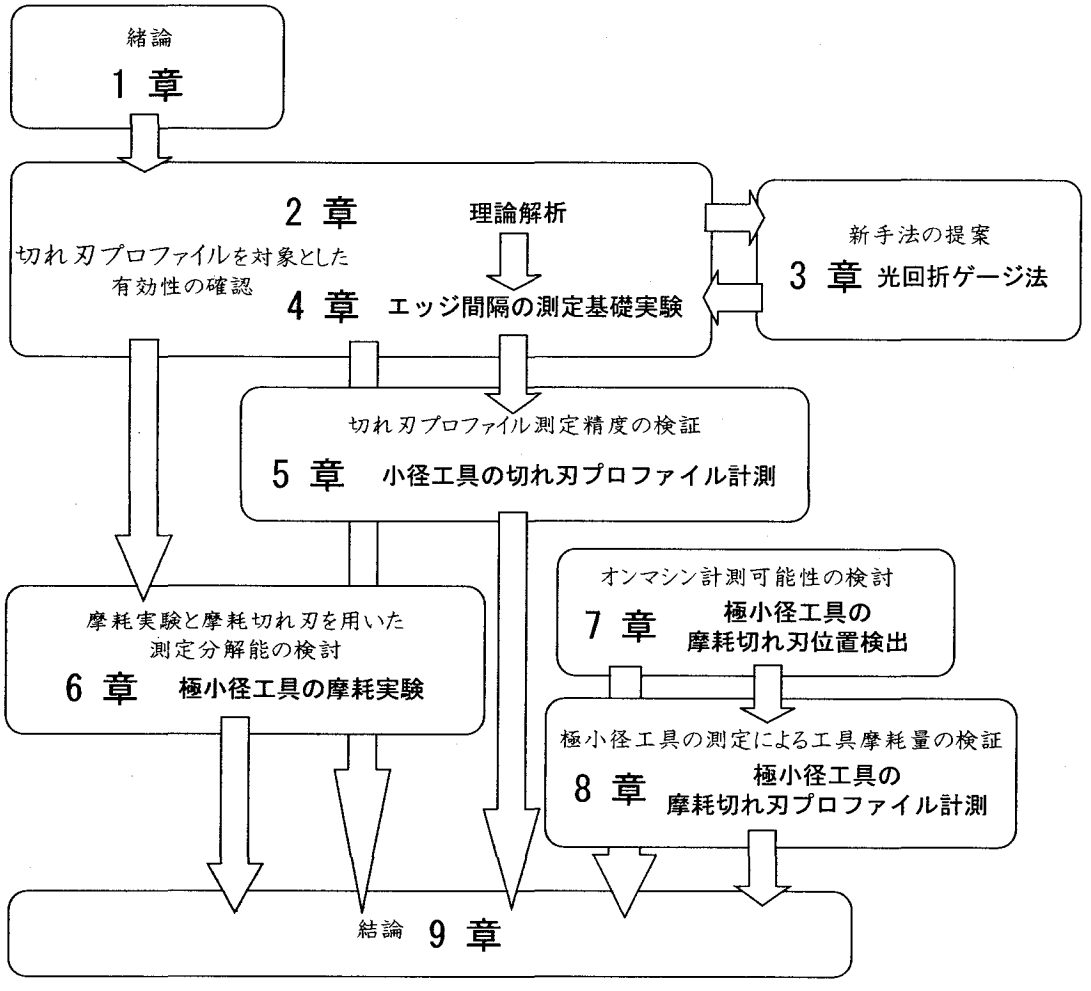


Fig. 1.3 Organization of this thesis.

第2章　理論解析

Mechanics is the paradise of the mathematical sciences,
because by means of it one comes to the fruits of mathematics.
Leonardo da Vinci (1452 – 1519)

"In other word, without application in mechanical engineering,
mathematics has little purpose."

2.1　緒言

回折現象を最初に述べたのは，Leonardo da Vinci である．当時は光の粒子説が光の伝播を正確に記述できると広く信じられていたが，回折を説明することはできなかった．波動説の最初の提案者はホイヘンス（Huygens）であるが，波動説による回折現象を説明することはなかった．1818年にフレネル（Fresnel）がホイヘンスの原理†と干渉の考え方を用いること（Huygens–Fresnel の原理）によって回折を説明できることを示した．その後（1882年）フレネルの解析は，キルヒホッフ（Kirchhoff）によって明快な数学的基礎が与えられた[22]．

この章では，まず回折理論によく用いられる Fresnel - Kirchhoff の回折公式への導入[22]–[26]を述べ，Fraunhofer 回折の導出に至るまでの数学的基礎づけを行なう．次に，導入した Fraunhofer 回折理論に基づって本計測手法に利用されるエッジ間隙測定法の分解能を解析し，ならびにこの手法はオンマシンに適用が可能であることを示す．

† Huygens の原理：波面上の各点から出る球面波（素元波または二次波と呼ぶ）をつないだ面が，次の波面になる．

2.2 Fresnel-Kirchhoffの回折公式

Fresnel-Kirchhoffの回折公式を導入するために，まずマクスウェルの方程式から出発して，電磁波の性質をもつ光を表わすヘルムホルツの波動方程式を導く．次に，グリーンの定理を導入し，時間に依存しないヘルムホルツの波動方程式を満たして，また点光源からの波が球面波であることによって任意の点における光波の複素振幅を求めることのできるHelmholtz-Kirchhoffの積分定理を導く．この定理により，点光源からの光波が有効開口を通過したときの回折公式が求められる．

2.2.1 Helmholtz方程式の導入

マクスウェル(Maxwell)はそれまでに知られていた，電界$\mathbf{E}$と磁界$\mathbf{H}$に関する基本式に，新たに変位電流の概念を導入して，電流密度$\mathbf{j}$と電荷密度ρに関する連続の方程式の矛盾を解消し，電磁波の存在を1864年に予言した．電磁波の存在はヘルツ(Hertz)によって1888年に実証された．

本論文は光波を対象とするので，媒質は電荷や電流が存在しない(電荷密度$\rho = 0$，電流密度$\mathbf{j} = 0$)誘電体とする．また，εとμが，それぞれ媒質中の誘電率(dielectric constant)，透磁率(magnetic permeability)を表わし，共に時間と位置に依存しない．つまり媒質が等方性をもつことである．このとき，マクスウェル方程式(Maxwell's equations)によって，媒質中の電磁界は

$$\nabla^2\mathbf{E} - \varepsilon\mu\frac{\partial^2\mathbf{E}}{\partial t^2} = 0 \quad , \quad \nabla^2\mathbf{H} - \varepsilon\mu\frac{\partial^2\mathbf{H}}{\partial t^2} = 0 \tag{2.1}$$

が得られる．また，一般形の波動方程式を比較すると$1/\sqrt{\varepsilon\mu}$は媒質中の伝播速度vを表わすことが分かる．これより，一様媒質中での単色な電磁波の形式解[‡]は時間tと位置ベクトル$\mathbf{r}$に依存する項の変数分離形で求めるため，

[‡] 一般に様々な分野における慣習的に，式(2.1)中の電界$\mathbf{E}$のみを考慮する．

$$\mathbf{E}(\mathbf{r},t) = u(\mathbf{r})T(t) \tag{2.2}$$

のように位置ベクトル $\mathbf{r}$ のみの関数と時間 t のみの関数の積の形の解を仮定する．すると，式 (2.1) から次式を得る．

$$\frac{1}{v^2}\frac{\nabla^2 u(\mathbf{r})}{u(\mathbf{r})} = \frac{1}{T(t)}\frac{d^2T(t)}{dt^2} \quad \Big(= -\text{定数}^2 \text{とおく}\Big) \tag{2.3}$$

まず，右辺の項を注目して，定数の係数をもつ 2 階の線形微分方程式[§]になり，その微分方程式の一般解により，「定数 = 角周波数 ω」であることが分かる．次に左辺を注目すると，次式

$$\nabla^2 u(\mathbf{r}) + k^2 u(\mathbf{r}) = 0 \tag{2.4}$$

が得られ，ただし，波数[¶] k は $k = \dfrac{\omega}{v} = \dfrac{2\pi}{\lambda}$ と定義される．この式は電磁波の位置に関する情報を含んでおり，ヘルムホルツ (Helmholtz) 方程式と呼ばれている．

---

§ $\dfrac{d^2T(t)}{dt^2} + \text{定数}^2\ T(t) = 0$

¶ 光学における慣習として，$1/\lambda$ を分光学的波数 (Spectroscopic wave number) と呼び，$k = 2\pi/\lambda$ によって定義される k を波数 (wave number) という．

2.2.2 Helmholtz - Kirchhoffの積分定理

閉曲面 S によって囲まれた領域を V とし，その内部の任意の点を P とする (図2.1)．そこで，U と W は，この曲面上およびその内部で，1次および2次微分が連続とする．W を U と同じ連続条件を満たす別の任意関数とすれば，Greenの定理より，

$$\iiint_V (U\nabla^2 W - W\nabla^2 U)dV = \oiint_S (U\nabla W - W\nabla U)\cdot d\mathbf{S} \tag{2.5}$$

が成立する．特に，U と W が時間に依存しないヘルムホルツの波動方程式 (2.4) を満たすとすれば，式 (2.5) 左辺の体積積分がすべての点で零になり，次式が得られる．

$$\oiint_S (U\nabla W - W\nabla U)\cdot d\mathbf{S} = 0 \tag{2.6}$$

しかし，ここでは物理的観点から，光波 W として，点 P を中心とした外向き球面波にとると，点 P から距離 r にある光波 W の複素振幅は

$$W = \frac{e^{ikr}}{r} \tag{2.7}$$

で表わせる．この関数は $r = 0$ が特異点であるが，W は連続で，かつ，微分可能でなければならないため，点 P を積分領域から外さなければならない．このため，P を中心として半径の小さな球を考え，この表面を S' とし，積分は S と S' の間で行なう (図2.1)．これより，式 (2.6) は，

$$\oiint_S \left\{U\nabla\left(\frac{e^{ikr}}{r}\right) - \frac{e^{ikr}}{r}\nabla U\right\}\cdot d\mathbf{S} + \oiint_{S'} \left\{U\nabla\left(\frac{e^{ikr}}{r}\right) - \frac{e^{ikr}}{r}\nabla U\right\}\cdot d\mathbf{S} = 0$$

と書ける．この際，S' 面の外向き法線方向が，実は内部の点 P に向くことに注意して，点 P から見た S' に対する立体角を $d\Omega$ とすると，S' 面の積分では

$$\nabla\left(\frac{e^{ikr}}{r}\right)\cdot d\mathbf{S} = -\left(\frac{ik}{r} - \frac{1}{r^2}\right)e^{ikr}r^2 d\Omega\,, \quad \nabla U\cdot d\mathbf{S} = -\left(\frac{dU}{dr}\right)r^2 d\Omega$$

となる．これを利用して，式 (2.6) より

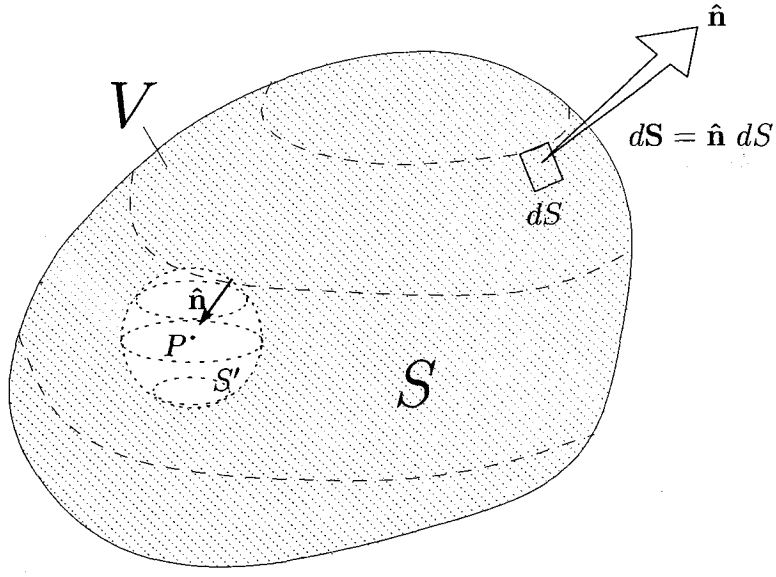


Fig. 2.1 Derivation of the Helmholtz - Kirchhoff integral theorem: region of integration.

$$\oiint_S \left\{ U\nabla\left(\frac{e^{ikr}}{r}\right) - \frac{e^{ikr}}{r}\nabla U \right\} \cdot d\mathbf{S} = -\oiint_{S'} \left\{ U\left(\frac{1}{r^2} - \frac{ik}{r}\right) e^{ikr} + \frac{e^{ikr}}{r}\frac{dU}{dr} \right\} r^2 d\Omega \tag{2.8}$$

そして，$r \to 0$ とする．このとき，左辺は不変であるが，右辺で第2，3項目は消失し，第1項目だけが残る．よって，式(2.8)の右辺は

$$\lim_{r\to 0} -\oiint_{S'} \left\{ U(1-ikr) + r\frac{dU}{dr} \right\} e^{ikr} d\Omega = -\oiint_{S'} U(P) d\Omega = -4\pi U(P) \tag{2.9}$$

となる．以上をまとめて，式(2.8)より，点 P における光波の複素振幅 $U(P)$ は

$$U(P) = \frac{1}{4\pi}\oiint_S \left\{ \frac{e^{ikr}}{r}\nabla U - U\nabla\left(\frac{e^{ikr}}{r}\right) \right\} \cdot d\mathbf{S} \tag{2.10}$$

と書ける．これを Helmholtz - Kirchhoff の積分定理と呼ぶ．式(2.10)は，任意の点における光波の複素振幅が，それを取り囲む閉曲面上の光波の複素振幅 U と，その法線方向の微分 ∇U が既知ならば，求められることを示している．ただし，閉曲面内に光源を含んではいけない．

2.2.3 Fresnel-Kirchhoffの回折理論

点光源P_0から発した光波が，有限開口を通過した後，観測点Pに形成する光波の複素振幅を求めるのにHelmholtz - Kirchhoffの積分定理式(2.10)を利用する．面積分する際，開口に対して点光源を含まない空間を図2.2に示すように，開口面上S_1，遮光部S_2観測点Pを含む曲面S_3に分ける．S_1およびS_2上で，開口と遮光部境界の数波長程度離れた所までは，互いに影響を及ぼし合っている．しかし，開口部が波長より十分大きければ，この影響は無視できる．

開口面上S_1には，点光源P_0から発した光波が到着する．出発点での光波の振幅をA，光源P_0と面上の点P'との距離をr_0とすれば，S_1上では，

$$U = \frac{Ae^{ikr_0}}{r_0} \tag{2.11}$$

$$\nabla U = \frac{\partial U}{\partial n}\hat{\mathbf{n}} = \frac{\partial}{\partial n}\left(\frac{Ae^{ikr_0}}{r_0}\right)\hat{\mathbf{n}}$$

となる．P_0P'とS_1での外向き法線$\hat{\mathbf{n}}$のなす角を(n, r_0)で表わせれば，

$$\frac{\partial U}{\partial n} = \frac{Ae^{ikr_0}}{r_0}\left(\frac{1}{r_0} - ik\right)\cos(n, r_0) \approx -\frac{ikAe^{ikr_0}}{r_0}\cos(n, r_0) \tag{2.12}$$

距離r_0が波長よりも十分長いと仮定して，$1/r_0^2$を無視した．同様にして，$P'P$と法線$\hat{\mathbf{n}}$のなす角を(n, s)で表わすと，次式が得られる．

$$\frac{\partial}{\partial n}\left(\frac{e^{iks}}{s}\right) \approx -\frac{ike^{iks}}{s}\cos(n, s) \tag{2.13}$$

また，S_2上では，光が来ないから

$$U = 0\ , \quad \nabla U \cdot d\mathbf{S} = 0 \tag{2.14}$$

と書ける．S_3上では，曲面を十分大きくとれば，光波が十分減衰するから

$$U = 0\ , \quad \nabla U \cdot d\mathbf{S} = 0 \tag{2.15}$$

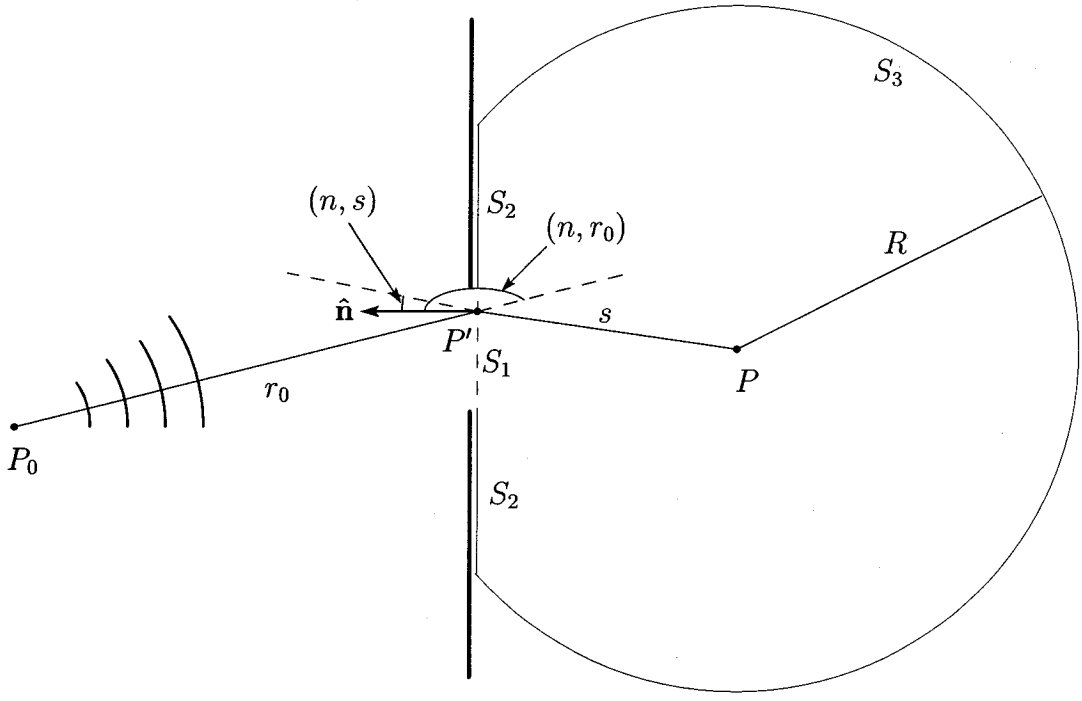


Fig. 2.2 Illustrating the derivation of the Fresnel-Kirchhoff diffraction formula.

と考えられる．式 (2.11)～式 (2.15) を式 (2.10) に代入して，観測点 P での光波の複素振幅が

$$U(P) = -\frac{iA}{2\lambda} \iint_{S_1} \frac{e^{ik(r_0+s)}}{r_0 s} [\cos(n, r_0) - \cos(n, s)]\, dS \tag{2.16}$$

で得られる．これは Fresnel - Kirchhoff の回折公式 (Fresnel-Kirchhoff diffraction formula) と呼ばれているものである．

2.3 Fraunhofer回折理論

光の進行が反射，屈折の法則によっては説明できず，たとえば光が物体の陰になるべき部分へ回り込む現象を回折現象という．回折現象を厳密に解くには，マクスウェルの方程式を使って境界条件のもとに解を求めればよいが，これは遮光物体の電磁的性質にも存在し，きわめて複雑な計算が必要である．ここでは開口の大きさが，波長に比べて大きくまた光源，観測点までの距離に比べて十分小さい場合について，スカラー波を用いて導かれたFresnel-Kirchhoffの回折式を出発点として，Fraunhofer回折理論[27],[28]を説明する．

図2.3に示すように，波長λの単色光源P'から出る光が開口Sで回折する場合，観測点Pの光の複素振幅$U(P)$はFresnel-Kirchhoffの回折式（2.16）で計算できる．

$$U(P) = \frac{iA}{2\lambda}\iint \frac{e^{ik(r+r')}}{rr'}(\cos\theta + \cos\theta')\,dS \tag{2.17}$$

ここでAは点光源P'からの単位距離進んだ時の振幅，r, r'は$PQ, P'Q$間の距離，θ, θ'は$PQ, P'Q$が開口面法線となす角で，積分は開口にわたって行なわれている‖．

式(2.17)の計算をさらに進めることを考える．被積分関数の中で分子の$e^{ik(r+r')}$の項はr, r'のわずかな変化に対して振動的に変化する周期関数であるが，分母のr, r'の変化は，開口の大きさがr, r'に比べて小さければ，問題とする観測点近傍では開口にわたってほぼ一定と考えられ，積分の外に出すことができる．また回折波の振幅が最大の位置は，当然P'と開口中心の延長線上にあり，この近傍での振幅だけが意味のある大きさを持つので，開口面法線とr'_0とのなす角をδとしたとき，$\cos\theta \approx \cos\theta' \approx \cos\delta$とおくことができる．さらに図2.3を考慮して

$$r \approx \sqrt{r_0^2 + (x-\xi)^2 + (y-\eta)^2} = r_0\sqrt{1 + \frac{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2}{r_0^2}}$$

‖ 式(2.17)を導くのに用いる“Kirchhoffの境界条件”には数学的に重大な欠陥がある．しかし，実験結果は，式(2.17)による計算結果と普通よく一致するので，この式が回折の取り扱いに用いられることが多い．

これの展開による近似は

$$\left.\begin{aligned} r &\approx r_0 - \frac{x\xi + y\eta}{r_0} + \frac{\xi^2+\eta^2}{2r_0} - \frac{(x\xi+y\eta)^2}{2r_0^3} - \cdots \\ r' &\approx r'_0 - \frac{x'\xi + y'\eta}{r'_0} + \frac{\xi^2+\eta^2}{2r'_0} - \frac{(x'\xi+y'\eta)^2}{2{r'_0}^3} - \cdots \end{aligned}\right\} \tag{2.18}$$

の関係を用いると

$$U(P) = \frac{i\cos\delta}{\lambda}\frac{Ae^{ik(r_0+r'_0)}}{r_0 r'_0}\iint_S e^{ikf(\xi,\eta)}\,d\xi d\eta \tag{2.19}$$

が得られる．ただし，

$$f(\xi,\eta) = -\frac{x\xi+y\eta}{r_0} - \frac{x'\xi+y'\eta}{r'_0} + \frac{\xi^2+\eta^2}{2r_0} + \frac{\xi^2+\eta^2}{2r'_0} - \frac{(x\xi+y\eta)^2}{2r_0^3} - \frac{(x'\xi+y'\eta)^2}{2{r'_0}^3}\cdots \tag{2.20}$$

である．ここで，

$$l' = -\frac{x'}{r'_0} \quad , \quad l = \frac{x}{r_0} \quad , \quad m' = -\frac{y'}{r'_0} \quad , \quad m = \frac{y}{r_0} \tag{2.21}$$

によって，式 (2.20) は

$$f(\xi,\eta) = (l'-l)\xi + (m'-m)\eta + \frac{1}{2}\left\{\left(\frac{1}{r_0}+\frac{1}{r'_0}\right)(\xi^2+\eta^2) - \frac{(l\xi+m\eta)^2}{r_0} - \frac{(l\xi+m\eta)^2}{r'_0}\right\}\cdots \tag{2.22}$$

となる．

以上より，P における光波決定の問題は，式 (2.19) で与えられる積分計算に帰着する．当然ではあるが，f に含まれる ξ,η の 2 乗以上の項が無視できる場合を Fraunhofer 回折，ξ,η の 2 乗以上の項も考慮しなければならない場合を Fresnel 回折という．前者は光源, 観察点が無限遠にある場合に対応するが，式 (2.19) の被積分関数中の ξ,η の 2 乗以上の位相項が無視できる条件を計算すると，実際には

$$|r_0| \gg \frac{(\xi^2+\eta^2)_{\max}}{\lambda} \quad , \quad |r_0'| \gg \frac{(\xi^2+\eta^2)_{\max}}{\lambda} \tag{2.23}$$

であればよい．この条件はファーフィールド (Far field) の条件と呼ばれる．このとき

$$U(p,q) = C \iint_S e^{-ik(p\xi+q\eta)}\, d\xi d\eta \tag{2.24}$$

ここで

$$p = l - l' \quad , \quad q = m - m' \tag{2.25}$$

また C は光源および観察点の位置に依存する定数**である．

これまでは単なる開口を考えたが，開口の位置に開口 S の範囲内では複素振幅透過率 $g(\xi,\eta)$ であり，その外では 0 になるような物体を考えると式 (2.24) は

$$U(p,q) = C \int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty} g(\xi,\eta) e^{-ik(p\xi+q\eta)}\, d\xi d\eta \tag{2.26}$$

定数 C と物理量の関係を考える．開口に入射する全エネルギーを E とすれば，フーリエ変換についての Parseval の定理を用いて

$$E = \int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty} |U(p,q)|^2\, dpdq = |C|^2\lambda^2 \int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty} |g(\xi,\eta)|^2\, d\xi d\eta \tag{2.27}$$

$g(\xi,\eta) = A(\xi,\eta)e^{i\phi(\xi,\eta)}$ で $A(\xi,\eta) = 1$ の場合は，開口の面積を D としたとき，式 (2.27) を用い

$$|C|^2 = \frac{E}{\lambda^2 D} \tag{2.28}$$

回折パターンの中心の強度を I_0 とすれば，式 (2.26) を用い

$$I_0 = |U(0,0)|^2 = \frac{ED}{\lambda^2} \tag{2.29}$$

Fraunhofer 回折は, レンズを使えば図 2.4 の配置で実現できる．この場合光源側, 像側のレンズの焦点距離をそれぞれ f', f とすれば

** 積分式 (2.19) の前側の定数である．

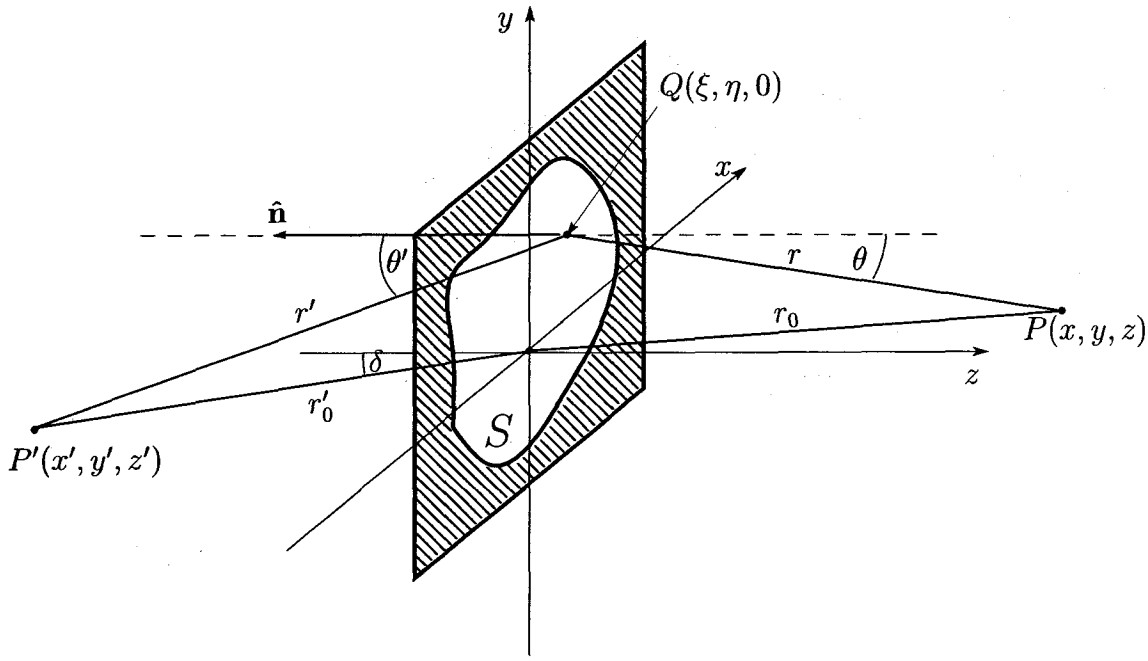


Fig. 2.3 Diffraction at an aperture.

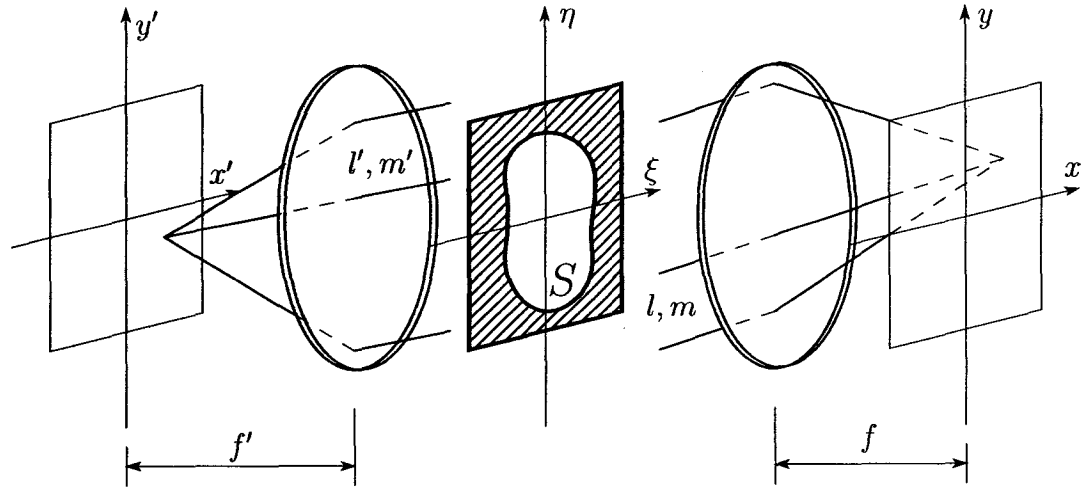


Fig. 2.4 Fourier transformation lens system.

$$l' = -\frac{x'}{r_0'} \approx -\frac{x'}{f'}\ ,\quad l = \frac{x}{r_0} \approx \frac{x}{f}\ ,\quad m' = -\frac{y'}{r_0'} \approx -\frac{y'}{f'}\ ,\quad m = \frac{y}{r_0} \approx \frac{y}{f} \tag{2.30}$$

と近似できる．特に $l' = m' = 0$，すなわち物体照明光が平行で垂直入射する場合，式 (2.26) は

$$U(x,y) = C \int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty} g(\xi,\eta) \exp\left\{-i\frac{2\pi}{f\lambda}(x\xi + y\eta)\right\} d\xi d\eta \tag{2.31}$$

と表わされる．式 (2.31) の積分項は開口 $g(\xi,\eta)$ のフーリエ変換を表わしており，このことから Fraunhofer 回折像は開口のフーリエ変換であるという光学系的に重要な性質が導かれた．図 2.4 のような光学系はフーリエ変換光学系と呼ばれる．

2.4 ナイフエッジ間の回折光

図2.5に微小間隙において，Fraunhofer領域での回折光強度分布の図解を示す．ここでは，両方のナイフエッジを理想のエッジとし，また，照射するレーザ光としては，平面波の一様強度のシートレーザビームと仮定した．すると，フーリエ変換レンズ焦点面における光回折強度分布は式(2.31)の一次元的に考慮することで求められる．式(2.31)[††]より

$$U(w) = C\int_{-\infty}^{\infty} g(\xi)\exp\left\{-i\frac{2\pi}{r_0\lambda}(w\xi)\right\}d\xi \tag{2.32}$$

が得られる．そして，開口(間隙)の透過率$g(\xi)$は障害物がないから$g(\xi)=1$とし，間隙の長さ$D=x$を代入すると，

$$U(w) = C\int_{-x/2}^{x/2} \exp\left\{-i\frac{2\pi}{r_0\lambda}(w\xi)\right\}d\xi$$

になる．さて，

$$\int_{-x/2}^{x/2} e^{-i\frac{2\pi w\xi}{r_0\lambda}}d\xi = -\frac{1}{i\frac{2\pi w}{r_0\lambda}}\left[e^{-i\frac{2\pi w}{r_0\lambda}\frac{x}{2}} - e^{i\frac{2\pi w}{r_0\lambda}\frac{x}{2}}\right] = \frac{\sin\frac{\pi wx}{r_0\lambda}}{\frac{\pi w}{r_0\lambda}}$$

であり，正規化された強度は式(2.28)，式(2.29)，また強度$I=|U|^2$[‡‡]により

$$\frac{I(w)}{I_0} = \frac{|U(w)|^2}{|C|^2D^2} = \frac{1}{|C|^2x^2}\frac{|C|^2\sin^2\frac{\pi wx}{r_0\lambda}}{(\frac{\pi w}{r_0\lambda})^2} = \left(\frac{\sin\beta}{\beta}\right)^2 \tag{2.33}$$

この関数のように振舞う．ただし，位相差パラメーター

$$\beta = \frac{\pi wx}{r_0\lambda} = \frac{\pi}{\lambda}x\sin\theta \tag{2.34}$$

であり，θは回折角(Diffraction angle)と呼ばれる．また，$I(w)$は回折角θのパラメータでも表わすことができ，すなわち，$I(\theta)$とも書き換えることができる．

[††] 近似しないため，fをr_0のままにする．

[‡‡] 単位面積を単位時間当たりに通過する電磁エネルギーの平均値として定義された「強度」は，一般に偏光していない準単色な場のエネルギー密度とエネルギー流は，1個の複素振幅関数からこのように導ける[22]．

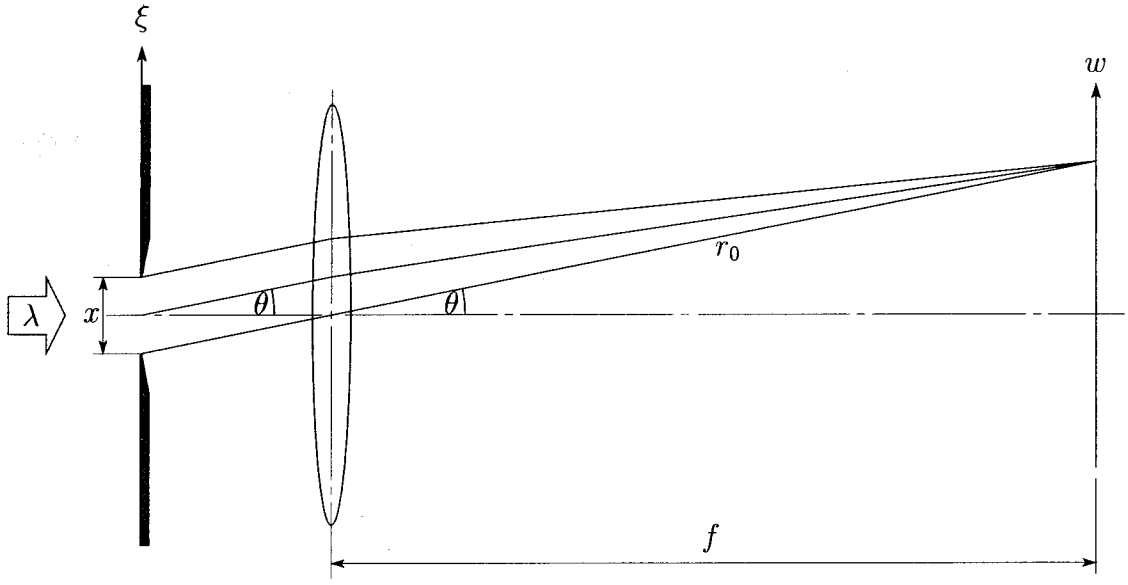


Fig. 2.5 Illustration of fraunhofer diffraction of an edge spacing.

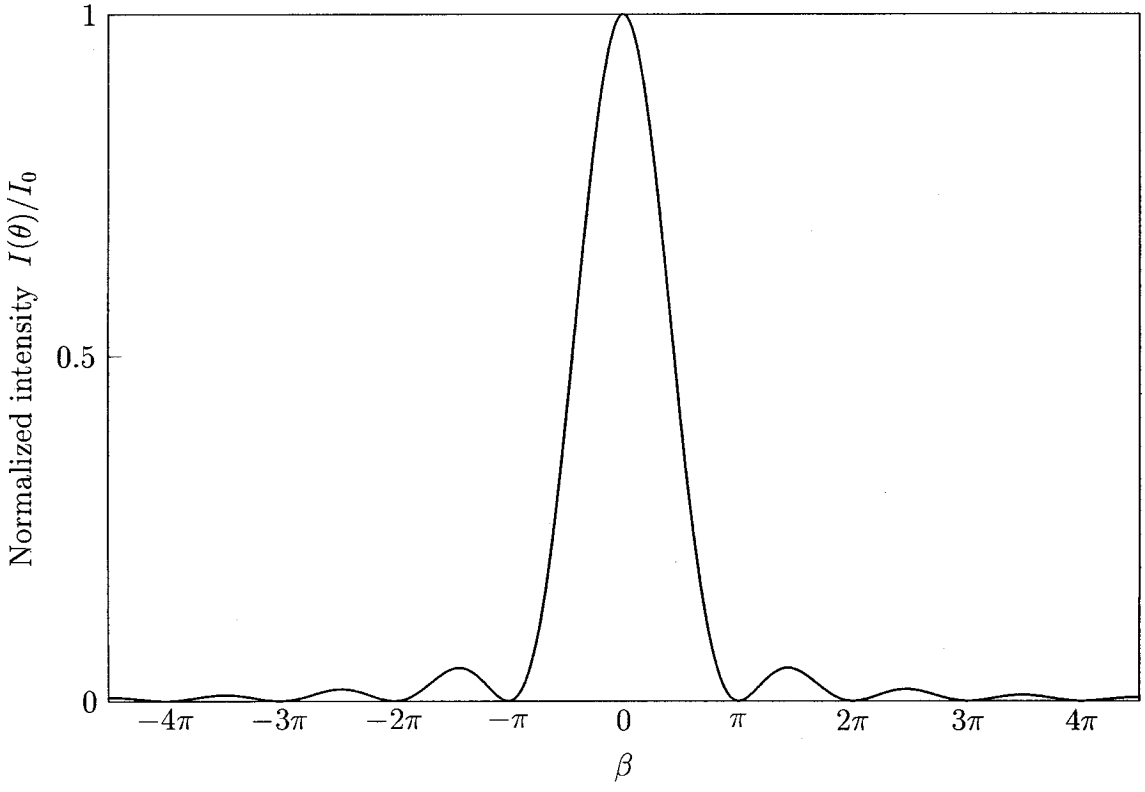


Fig. 2.6 Fraunhofer diffraction at an edge spacing . The function $\left(\frac{\sin\beta}{\beta}\right)^2$.

ここで，この回折強度分布 (以下，回折パターンと呼ぶ) の特徴を詳しく論じる．関数 $f(\beta) = (\sin\beta/\beta)^2$ は図 2.6 に示されているが，これは $\beta = 0$ に主極大 $f(0) = 1$ を持ち，$\beta = \pm\pi, \pm 2\pi, \pm 3\pi, \ldots$ では零のの極小値をとる．極小値の間には，局所的な極大値が存在し，その位置は，$\tan\beta - \beta = 0$ で得られる．これは $f(\beta) = (\sin\beta/\beta)^2$ の極限が，β の値が

$$\frac{df(\beta)}{d\beta} = \frac{2\sin\beta \cdot (\beta\cos\beta - \sin\beta)}{\beta^3} = 0$$

に一致するものであり，極小値は $\sin\beta = 0$ かつ $\beta \neq 0$ のときである．また対比的に副次的な極大値が $\beta \neq 0$ で

$$\beta\cos\beta - \sin\beta = 0 \quad \text{または} \quad \tan\beta = \beta \tag{2.35}$$

を満たして，求められる．これらの極大値は式 (2.35) により図 2.7 のように直線 $f_1(\beta) = \beta$ と曲線 $f_2(\beta) = \tan\beta$ の重ねる点によって解く．交点は副次極大値を $\beta \approx \pm 1.4303\pi, \pm 2.4590\pi, \pm 3.4707, \ldots$ の位置に決定する．

これら隣り合う 2 本の暗縞の間に強度は極大をとる．しかしながら，これらの極大はすべて主極大よりずっと小さく，中心からの距離が大きくなるに従って急速に小さくなる (表 2.1)．

そして，回折パターンの振る舞いは同様であるが，今度は物理的な空間の焦点面での像面において注目する．すなわち，回折角による位相差 β を換えて，$r_0 = \sqrt{w^2 + f^2}$ から式 (2.34) により像面の位置パラメータ x で回折パターンを表わす．すると，像面での回折パターンは図 2.8 のように示すことができる．

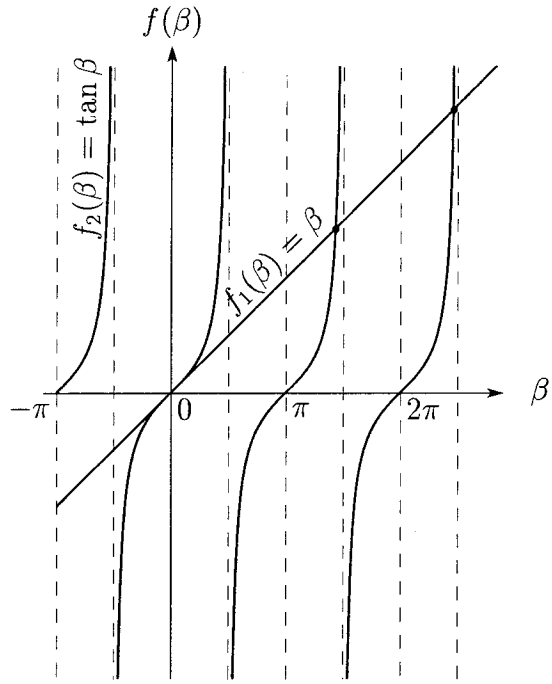


Fig. 2.7 The points of intersection of the curves $f(\beta) = \tan\beta$ with the straight line $f(\beta) = \beta$ are the solutions of subsidiary maxima.

Table 2.1 The first five maxima of the function $f(\beta) = \left(\frac{\sin\beta}{\beta}\right)^2$.

β	$f(\beta) = \left(\frac{\sin\beta}{\beta}\right)^2$
0	1
$1.430\pi = 4.493$	0.04718
$2.459\pi = 7.725$	0.01648
$3.471\pi = 10.90$	0.00834
$4.479\pi = 14.07$	0.00503

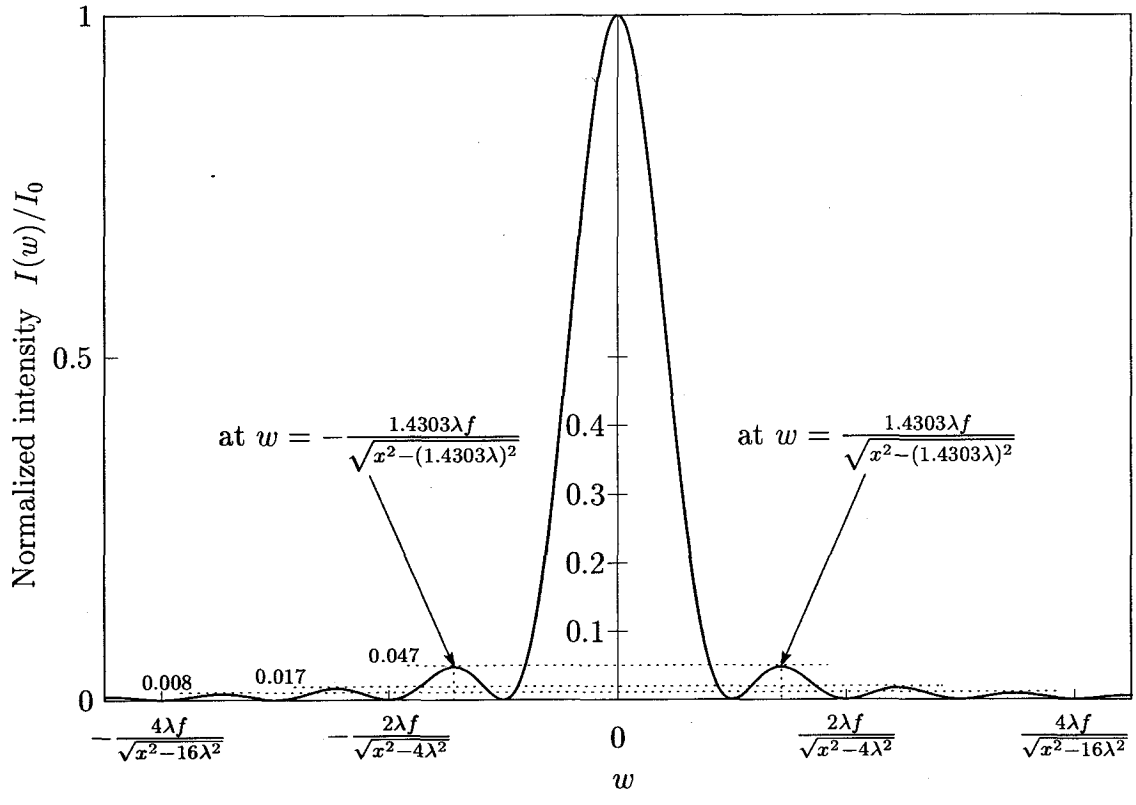


Fig. 2.8 Diffraction intensity distribution (Diffraction pattern) at focal plane.

2.5 光回折パターンによるエッジ間隙測定

2.5.1 ナイフエッジ間と1次回折光間の距離

図2.9には，これまで述べてきたレーザ光のFraunhofer回折理論に基づき，エッジ間隙測定のための光学系を示す．二枚のナイフエッジによって作られた微小間隙 x に，平面波で一様強度分布をもつ波長 λ のレーザ光を照射すると，光の回折現象が生じる．その際，照射光の進行方向に対して角度 θ（回折角と呼ばれる）で進む回折光が焦点距離 f のレンズにより，$w = f\tan\theta$ の位置に集光する．その焦点面において，前節より各位置における光強度分布の回折パターンは以下の式によって与えられる．

$$I(\theta) = I_0\left(\frac{\sin\beta}{\beta}\right)^2 = I_0\mathrm{sinc}^2(\beta) \tag{2.36}$$

ただし，I_0 は光強度の主極大値である．β は位相差であり，光路差 OB（$= x\sin(\theta)/2$）によって，

$$\beta = \frac{\pi x\sin\theta}{\lambda} \tag{2.37}$$

で定義される．

この回折パターンは多くのピーク値を持つが，主極大値以外で最も観測しやすい1次回折光の位置に注目する．これら二つの±1次回折光の位置 $w_{\pm1}$ は位相差 β が $\pm1.4303\pi$ のときであり[22],[25],[30]，式（2.37）により，$\sin\theta = \pm1.4303\lambda/x$ をとり，$w_{\pm1}$ は

$$w_{\pm1} = f\tan\left[\arcsin\left(\frac{\pm1.4303\lambda}{x}\right)\right] \tag{2.38}$$

で与えられる．したがって，回折パターンの±1次回折光との距離 W は

$$W = w_{+1} - w_{-1} \tag{2.39}$$

$$= 2f\tan\left[\arcsin\left(1.4303\lambda/x\right)\right] \tag{2.40}$$

になる．これより，レンズの焦点距離 f および照射レーザ光の波長 λ が既知であることから，回折パターンの1次光間隔 W を測定すれば，エッジ間隙 x は次式のように求めることができる．

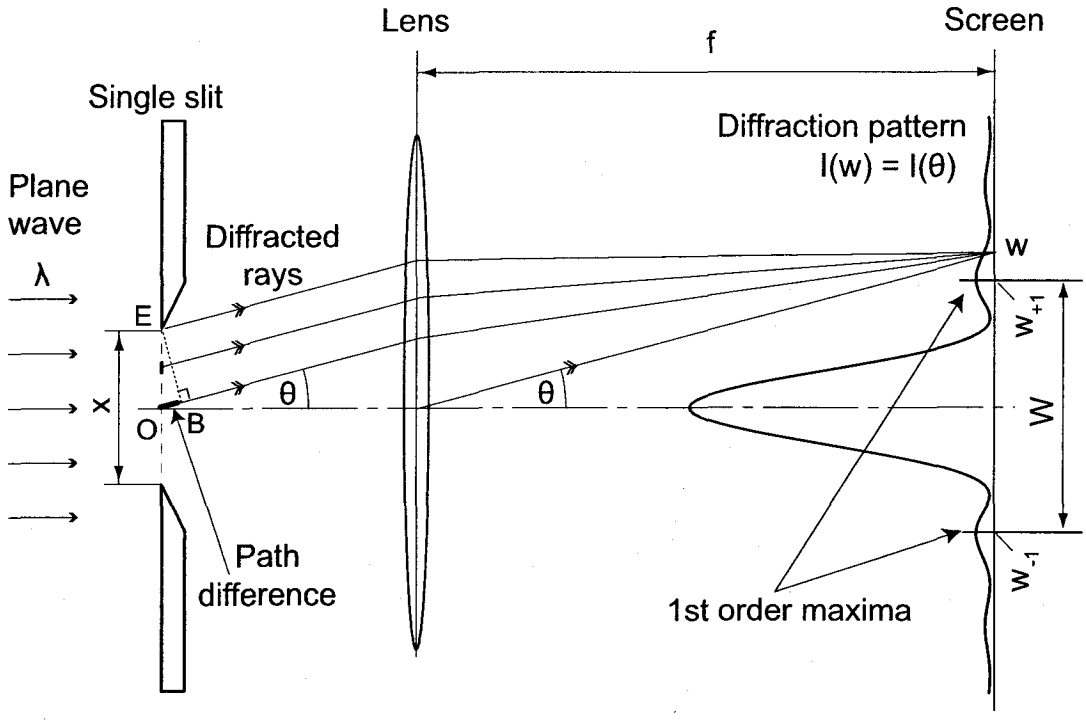


Fig. 2.9 Fraunhofer diffraction of an edge spacing. The edge spacing x can be obtained by measuring the width between 1st order maxima W.

$$x(W) = 1.4303\lambda\sqrt{1+\left(\frac{2f}{W}\right)^2} \tag{2.41}$$

また，回折パターンの 1 次回折光の位置は微小間隙とレンズ間の距離に無関係であるため，作動距離が長く，オンマシン環境に適する条件の一つが示されている．

2.5.2 測定分解能

図2.10に $\lambda = 650$ nm，$f = 100$ mm（以降の試作する計測システムと同じ条件）のときのエッジ間隙 x と1次光間隔 W の関係を示す．これはエッジ間隙 x が狭くなると，1次光間隔 W が広がるとともに，特性曲線の傾きも次第に大きくなり，高感度の測定ができることを示している．エッジ間隙 x が20 μm 前後の場合に，測定の感度が約500である．実際に回折パターンを取得する装置の要素サイズ（ＣＣＤラインセンサならピクセルサイズである）を考慮すると，1次光間隔の変化量を検知するには限界がある．たとえば，ＣＣＤラインセンサを用いる場合，ピクセルサイズが7 μm であれば，1次光間隔の変化量 ΔW が7 μm 以上でなければ検知できない．つまり，エッジ間隙を20 μm に設定し，感度が500であるときは，得られる測定分解能は (7 μm/ ピクセル)/500 = 14 nm/ ピクセルとなる．図2.11に設定エッジ間隙 x と測定分解能の関係を示す．この結果より，エッジ間隙を50 μm 以下に設定したとき，0.1 μm 以下のサブマイクロメートルの測定分解能が得られる．さらに，設定間隙を小さくすれば，より高分解能の測定が可能となる．設定間隙が15 μm 程度では，測定分解能は10 nm を切ることから，本手法の高精度計測への可能性を示唆している．

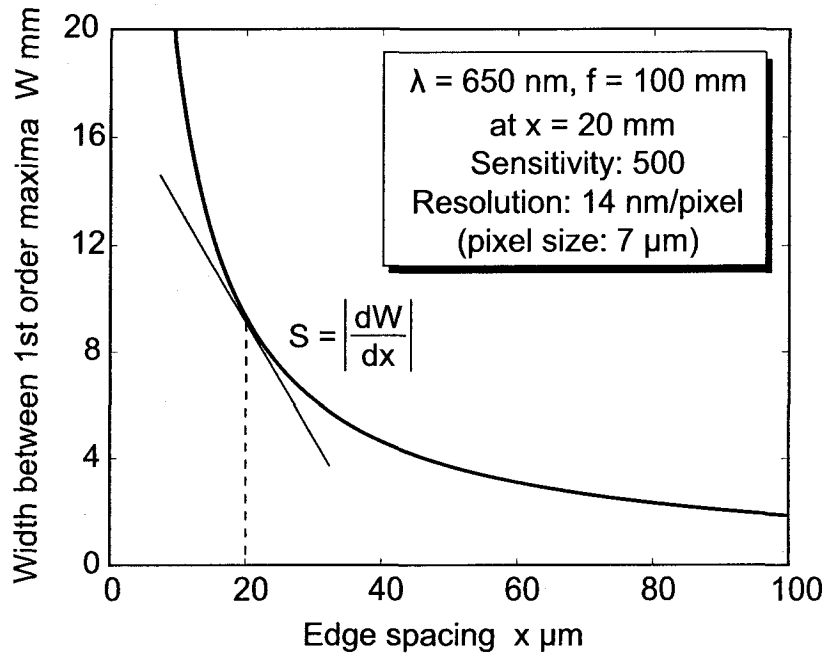


Fig. 2.10 Relationship between the spacing x and the width W.

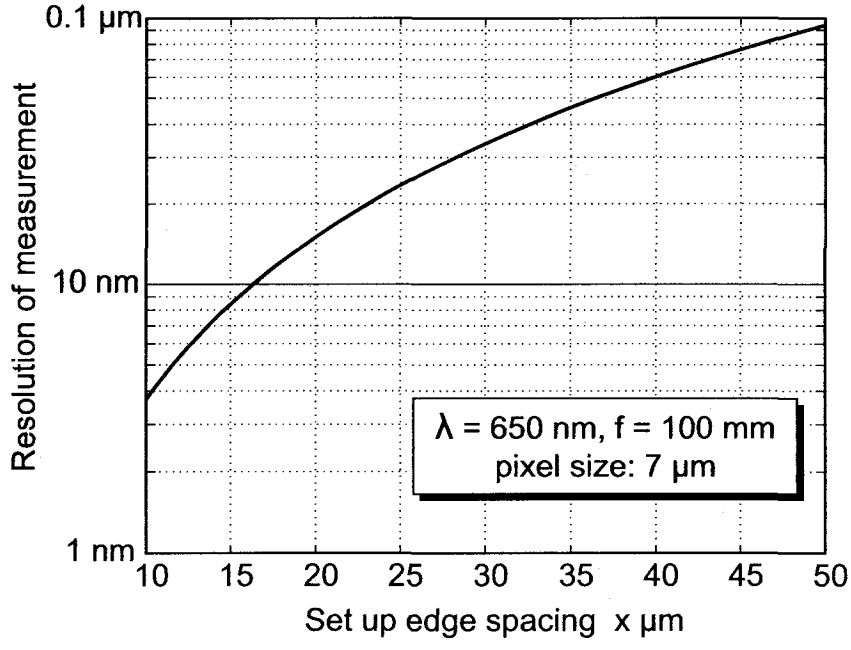


Fig. 2.11 Resolution of measurement at various edge spacings to be set up.

2.6 エッジのずれによる微小間隙の測定誤差

オンマシン環境下では，高精度仕様をもつ工作機械でさえ，切削工具の回転や位置決めなどの原因により，図2.12で示されるようなエッジのずれ Δz の発生が予想される．本節では，このエッジずれが本エッジ間隙測定法に与える測定誤差について考察する．

図2.12のようにエッジのずれが Δz である場合，θ 方向に進む回折光の光路差[31]–[33]は

$$OO' - EB = \frac{\sqrt{(\Delta z)^2 + x^2}\,[\sin\psi - \sin(\psi - \theta)]}{2}$$

$$= \frac{\Delta z(1 - \cos\theta) + x\sin\theta}{2} \tag{2.42}$$

である．このため，エッジずれが Δz であるとき，位相差 $\beta_{\Delta z}$ は

$$\beta_{\Delta z} = \frac{\pi\,[\Delta z(1 - \cos\theta) + x\sin\theta]}{\lambda} \tag{2.43}$$

となる．式（2.36）を拡張した回折パターンは

$$I(\theta, \Delta z) = I_0 \mathrm{sinc}^2\,(\beta_{\Delta z}) \tag{2.44}$$

で表わせる．この場合の回折パターンは理想の状態 $\Delta z = 0$（図2.12の破線パターン）と異なり，非対称の歪んだ実線パターンになる．この場合，± 1 次回折光の位置 $w'_{\pm 1}$ は前節と同様の条件，$\beta_{\Delta z} = \pm 1.4303\pi$ のときであり，式（2.43）より，

$$w'_{\pm 1} = f\tan\left[\arcsin\left(\frac{\pm 1.4303\lambda - \Delta z}{\sqrt{(\Delta z)^2 + x^2}}\right) + \arctan\frac{\Delta z}{x}\right] \tag{2.45}$$

である．エッジのずれ Δz を考慮した1次光間隔 W'（$= w'_{+1} - w'_{-1}$）を用い，式（2.41）に W として代入してエッジ間隙の測定値 $x' = x(W')$ を求めると，エッジ間隙の測定誤差 $\Delta x = x' - x$ を推定することができる．図2.13はエッジのずれが $\Delta z = 0$，1，3，5 μm であるとき，エッジ間隙が15 μm ～ 35 μm の範囲における測定誤差を表わしている．この結果より，エッジのずれが大きくな

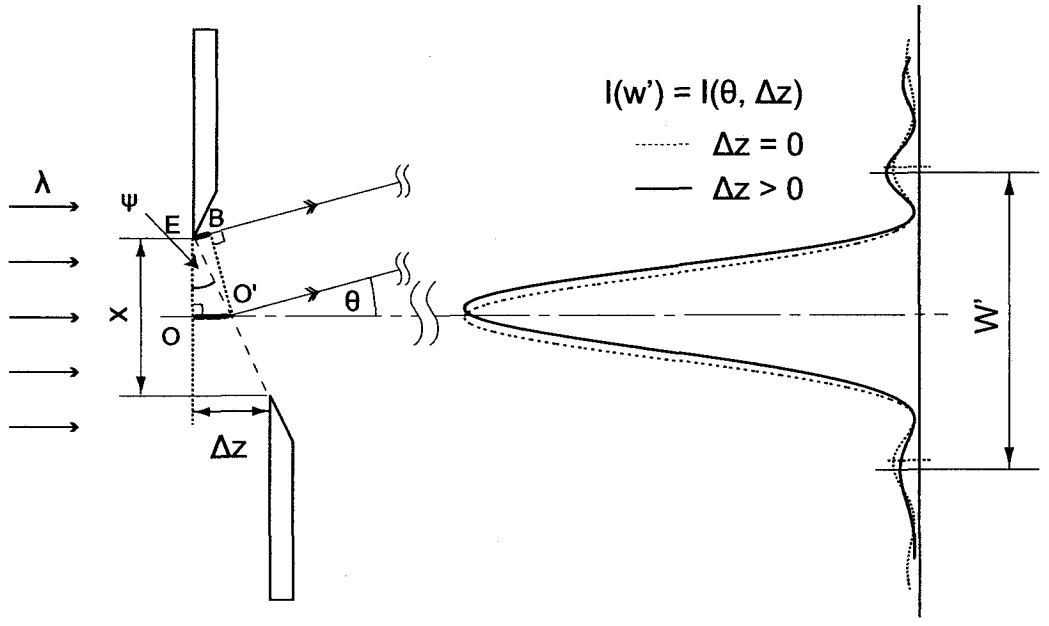


Fig. 2.12 Diffraction pattern with edge deviation Δz corresponding to the modified path difference.

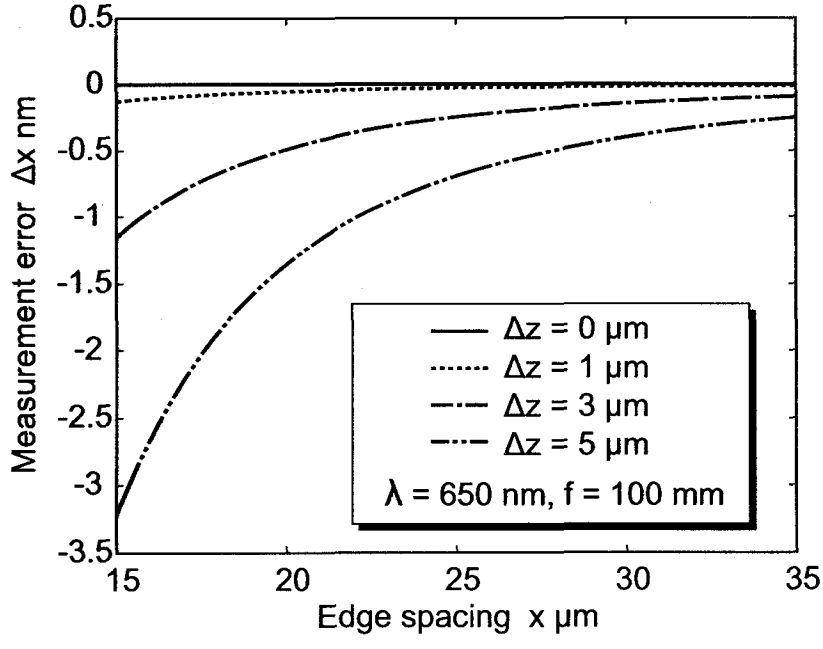


Fig. 2.13 Measurement errors Δx of edge spacing caused by edge deviation Δz ; $\Delta x = x(W') - x$.

ると測定誤差も大きくなるが，その値は，最も大きい $x = 15\ \mu\mathrm{m}$ ，$\Delta z = 5\ \mu\mathrm{m}$ で，たかだか 3.5 nm である．これは 1 次光間隔の測定値を用いた計測手法は，エッジのずれに対してもほとんど影響されず，オンマシン環境下における適用性を示している．

以上のことから，ナイフエッジ間隙の光回折を応用した本手法は，工作機械上の環境下において，サブマイクロメートル以下の分解能を持ち，非接触オンマシン高精度計測法の可能性を示唆している．

2.7 結言

本論文で提案する測定法，および本手法の基本原理であるFraunhofer回折理論，理論解析による測定分解能についてまとめた．解析結果から，微小間隙によって生じたFraunhofer回折パターンは間隙が小さくなるにつれて，パターン全体が横幅に広がることを利用し，その広がる度合いを測る対象を，真ん中の主強度以外に最も観測しやすい2つの1次回折光の間隔に採用した．この1次回折光間の距離（以降,「1次光間隔」と記す.）を測れば，エッジ間隙（数十μm）を非常に高い感度（数百2000倍以上）で測定することができる．そこで，本光学系の微小間隙の測定分解能を解析すると，光の波長が650 nm，レンズの焦点距離が100 mm，一般的のCCD素子の大きさ7 μmであるとすると，エッジ間隙が50 μm以下であれば，測定分解能は0.1 μm以下になることがわかった．さらに，エッジ間隙が15 μmとなると，測定分解能は10 nmを切ることから，本光学系の高精度計測への可能性が示された．

次に，実際に測定を行う際，本研究の被測定対象であるマイクロ工具切れ刃とナイフエッジとのエッジずれが依然としてあることから，それによる本光学系の測定誤差を解析した．その結果，エッジのずれが数μmあっても測定誤差が数nm程度しかないことから，オンマシンで測定する時に位置決めが問題とならないことがわかった．以上により，本光学系は，高分解能の測定法でありながら，シンプルさおよび長作動距離をもっており，それに測定する際の位置決めが測定誤差に影響を及ぼさないことから，高精度オンマシン計測への可能性を示唆している．

第3章　光回折ゲージ法

Necessity is the mother of invention.

Plato (430's - 347 B.E.)

3.1　緒言

第2章では，光回折パターンによるエッジ間隙測定を理論的に示した．本章では，エッジ間隙の測定法を利用して極小径工具の切れ刃プロファイルをサブマイクロメートルの精度で測定できる光回折ゲージ法を提案する．次に，その提案手法に基づく測定装置の試作について述べる．また，微小エッジ間隙に照射されるシートレーザビームの特性を調べ，レーザ投光器からのシートビームが測定に適用できることを示す．

3.2 光回折ゲージ法の測定原理

上述したエッジ間隙の計測に基づいた光回折ゲージ法の測定原理を図3.1に示す．二枚の基準ナイフエッジによってあらかじめ校正された間隙ゲージ G に，測定対象の極小径工具が挿入されている．工具切れ刃の各位置を測定するために，シリンドリカルレンズを用いて極薄なシート状レーザビームを両間隙 x_l，x_r をわたるように照射すると，その間隙で回折した光がフーリエ変換レンズによって，焦点面に回折パターンを結像する．ここでは，エッジ間隙を高速に計測すること，および間隙の一次元的な情報のみを把握するため，一次元配列のラインＣＣＤを用いて回折パターンを取得する．次に，その回折パターンの１次光間隔 W を検出し，工具切れ刃-基準ナイフエッジ間の距離を測定する．それぞれの x_l と x_r の間隙を測定するために，シャッターで他方のエッジ間隙による回折光をさえぎる．このように，測定したエッジ間隙値の x_l と x_r，および既知の間隙ゲージ G の値により，シートレーザビームで照射された位置の小径工具の径 d は

$$d = G - (x_l + x_r) \tag{3.1}$$

により求められる．また，工具を半回転させて同様な測定をすることで，左右の間隙変化量により工具回転の振れ精度も考慮できる．シートビームのスキャニングを行ない，同様の測定をすることにより，工具全体の切れ刃位置が計測できる．ここで，シートビームのスキャニングは工作機械によって被測定工具自体を上（あるいは下）に移動させるものとする．以上のように，光回折および間隙ゲージを応用した光回折ゲージ法は，極小径工具の切れ刃プロファイルを高精度で計測することができる．

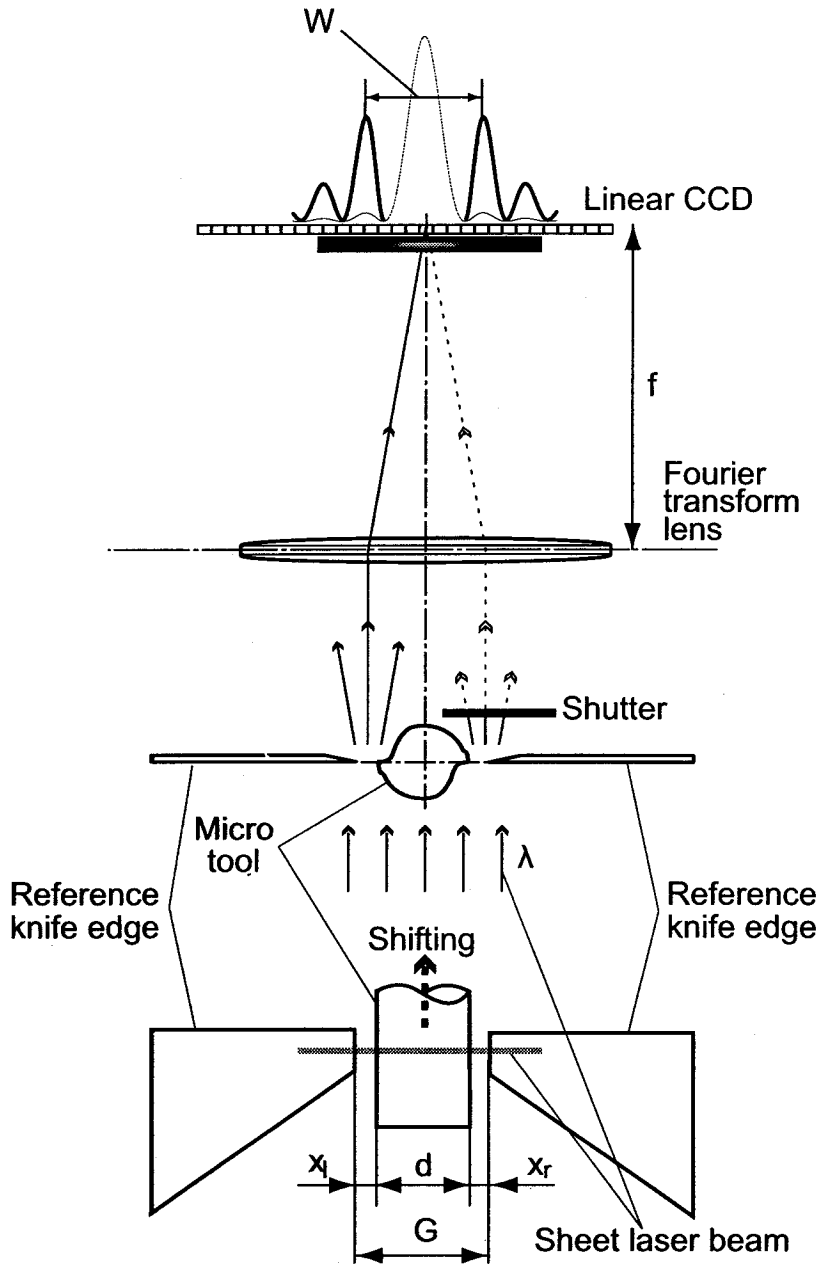


Fig. 3.1 Schematic of diffraction gauge method.

3.3 測定装置の構築

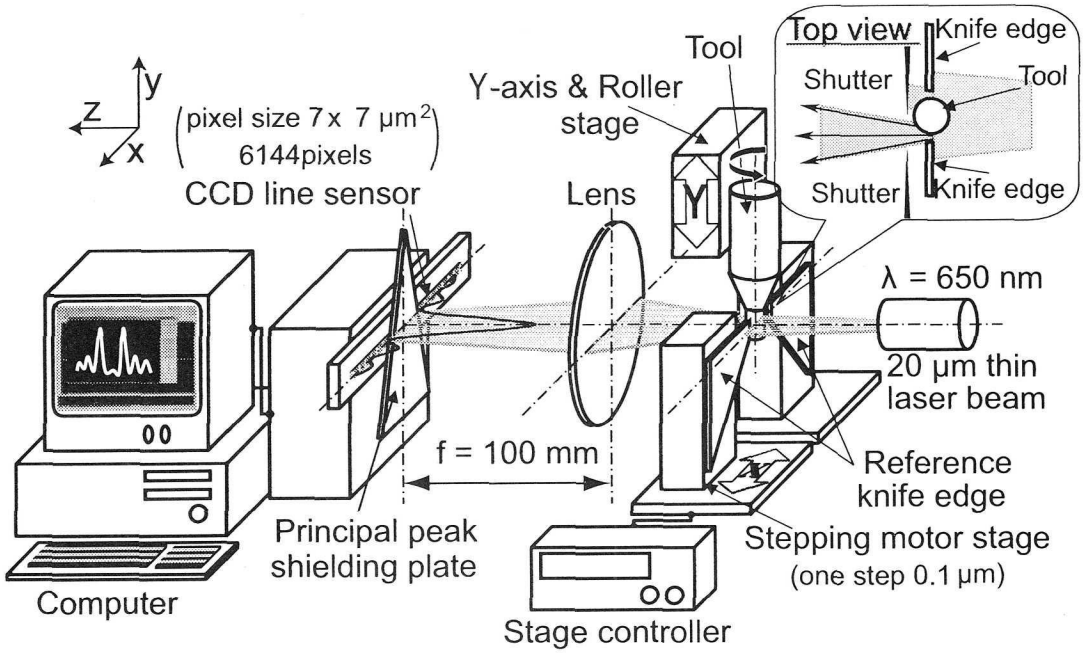
前節に提案した光回折ゲージ法に基づき，極小径工具の切れ刃プロファイルの測定実験装置（図3.2）を試作した．計測装置は，工具取付け部，間隙調整部，半導体レーザ光源，フーリエ変換レンズ，ＣＣＤラインセンサとデータ処理部，から構成されており，全体の大きさは 300 mm 四方で，全て定盤に設置されている．

3.3.1 計測システムの構成

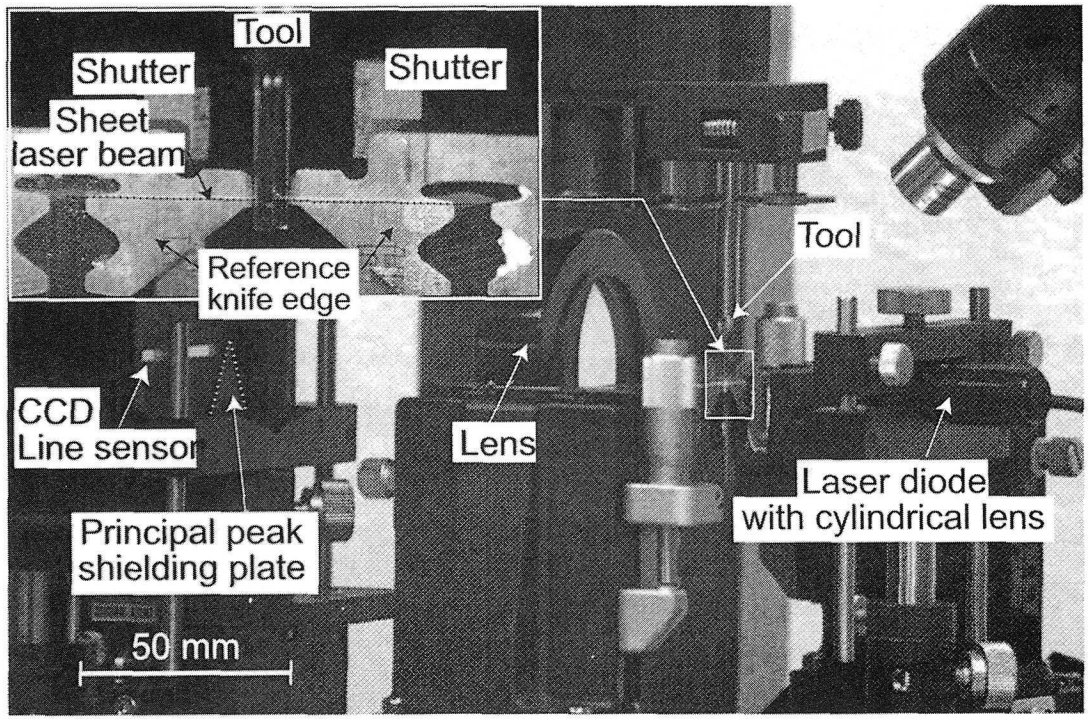
図3.2(a)には計測システムの構成を示す．波長650 nm の半導体レーザから射出した楕円形レーザビームは，シリンドリカルレンズにより厚み20 μm のシートビームに整形され，被測定小径工具と両基準ナイフエッジ間をわたるように照射される．このとき，生じる回折光は，フーリエ変換レンズ（焦点距離 $f = 100$ mm）を通り，焦点面で長さ約43 mm のＣＣＤラインセンサ（8ビット；1ピクセル7 μm $\times$ 7 μm；6144 ピクセル）により検出され，コンピュータでリアルタイムに処理される．間隙ゲージの設定については1ステップ0.1 μm の電動ステッピングステージで，基準ナイフエッジを x–軸方向に移動させて調整する．また，相対的なシートレーザビームの走査および被測定工具の回転は，y–軸とローラステージにより行なう．さらに，光回折ゲージにおいて左右それぞれのエッジ間隙からの回折パターンを別々に取得するため，シャッターが用いられる．

3.3.2 実験装置

図3.2(b)の写真は以上の構成によりつくられた装置の全景と拡大した光回折ゲージである．2枚の基準ナイフエッジ間に工具が挿入され，シートレーザビームで照射されている．



(a) Schematic diagram of experimental setup.



(b) Close-up views of the developed tool measurement systems.

Fig. 3.2 Experimental setup of tool edge profile measurement using diffraction gauge method.

3.3.3 投光器によるシート光ビームの特性

微小エッジ間隙による回折パターン観測において，照射する入射シートレーザビームの状態 (強度，ビーム厚さ，シートビームのビームウェストの輝度分布，干渉性など) は非常に重要である．なぜなら，入射シートビームの状態は直接回折光に影響を及ぼし，その回折光の強度分布に大きく関係するからである．そこで，まず光回折によるエッジ間隙測定の基本特性の一つである入射シートレーザビームの厚さ，広がりならびにそのの強度分布の測定を行なった．

シートレーザビームの厚さ 本基礎実験光学系では，1枚のシリンドリカルレンズによって構成された半導体レーザ投光器から射出する非常に細いシートビームはビームウェストをもって照射される．測定に使用したビームスキャンの仕様は表3.1に示し，測定実験の様子は図3.3に示す．まず垂直方向 (図3.3には y 軸方向) のビームの厚みを観測し，そのときの変位とビーム厚さの関係を図3.4に示す．シートビームの厚さは，far fieldでのビーム発散角が2.325° のパラメータから求められ，20.4 μm になり [29]，約20 μm である．

ビームの波形 また，平面波性を調べるために，上方から見た照射ビームの広がりの測定を行なった (図3.3の水平方向；x 軸方向での測定)．結果を図3.5に示す．この図において，光源は横軸の58320 μm の位置にあることと等価で，曲率が $1/58320 \approx 1.7 \times 10^{-5}$ μm^{-1} である．本手法で使われる設定間隙は大きい場合でも50 μm 以下になるので，角度に演算すると 8.5×10^{-4} Rad となる．さらに一様強度分布性を調べるため，図3.5の $z = 0$ の位置はシートビームの位置でビームウェストである．そのビームウェスト位置での光強度分布をCCDラインセンサを用いて (図3.6) 測定した．結果を図3.7に示す．そして移動平均の平滑化法†を用いて，CCDラインセンサにより生じたと思われる高周波ノイズの除去を施した結果を図3.8に示す．

次に，図3.9に間隙に照射されるシートビームの範囲（図3.8の点線範囲内）を拡大して示す．図中の影付きの部分が間隙部に相等する．これより，この範囲では一様強度分布であることがわかった．

† 4.3節に参照.

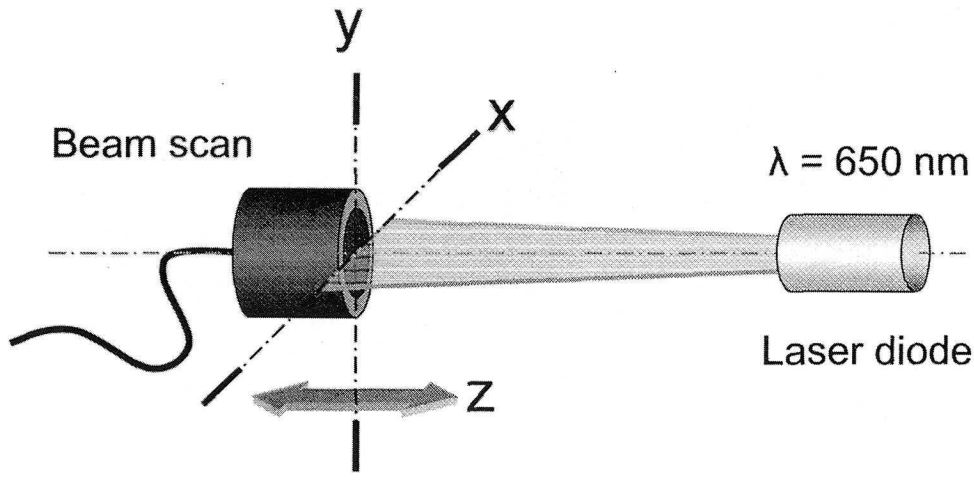


Fig. 3.3 Measurement of illuminating sheet laser beam by beam scan.

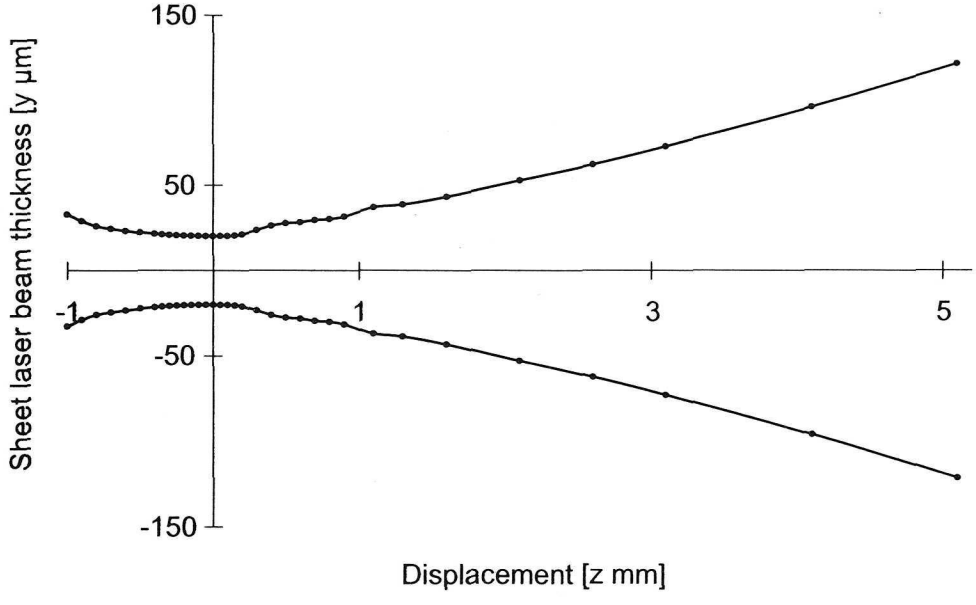


Fig. 3.4 Illuminating sheet beam nearby beamwaist.

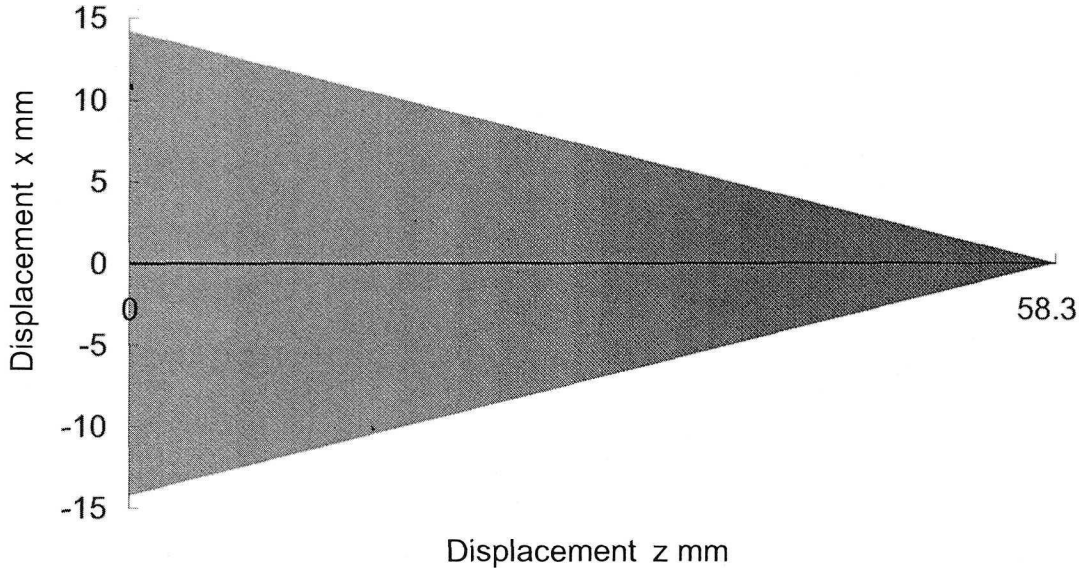


Fig. 3.5 Spread of illuminating sheet laser beam (from top view).

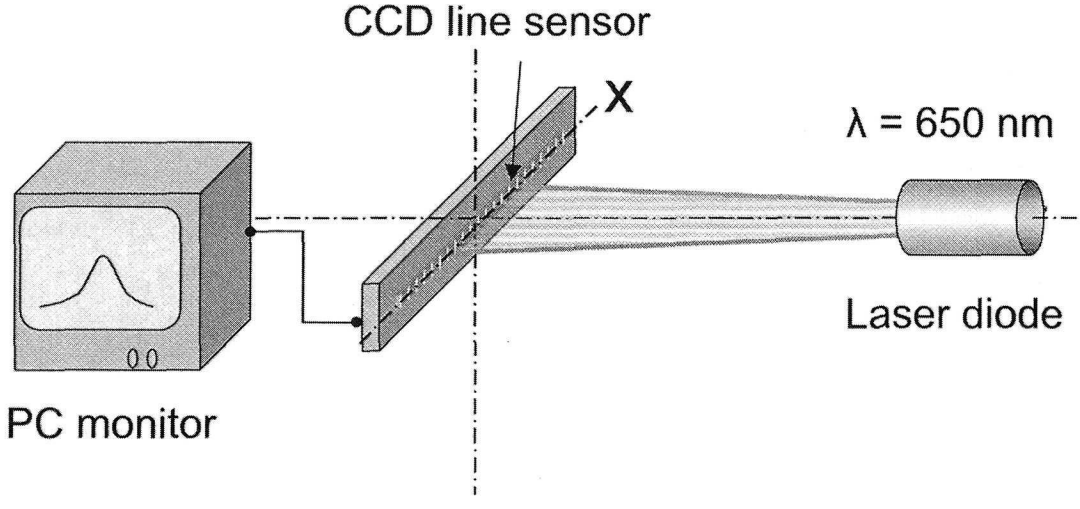


Fig. 3.6 Detection of intensity distribution at sheet beam waist.

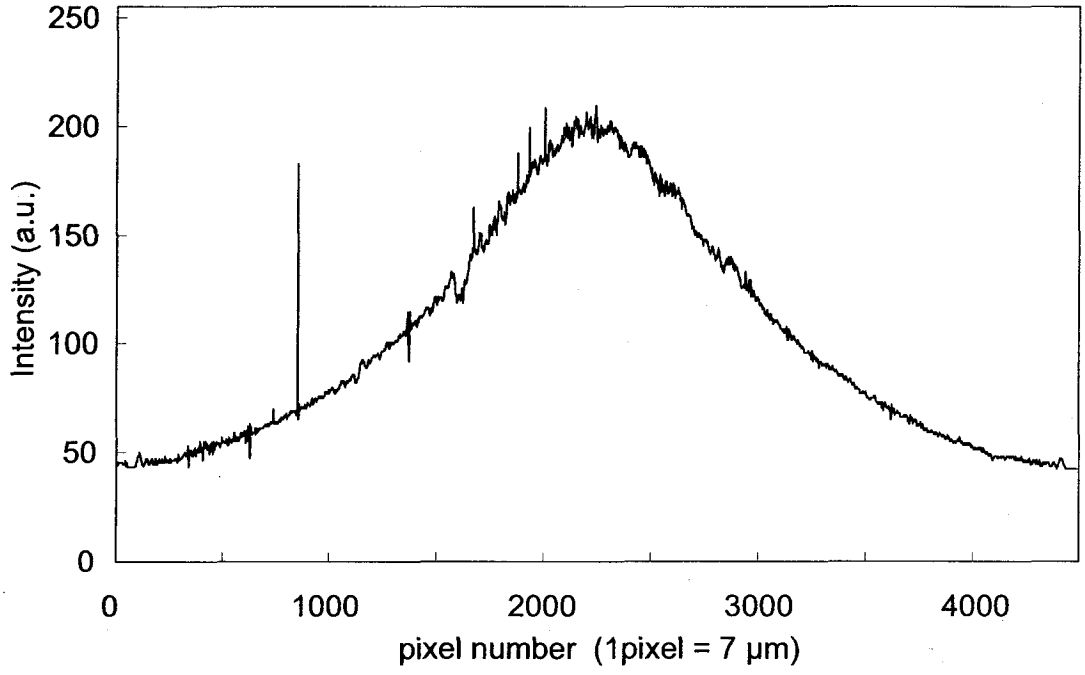


Fig. 3.7 Laser intensity distribution at sheet beam waist.

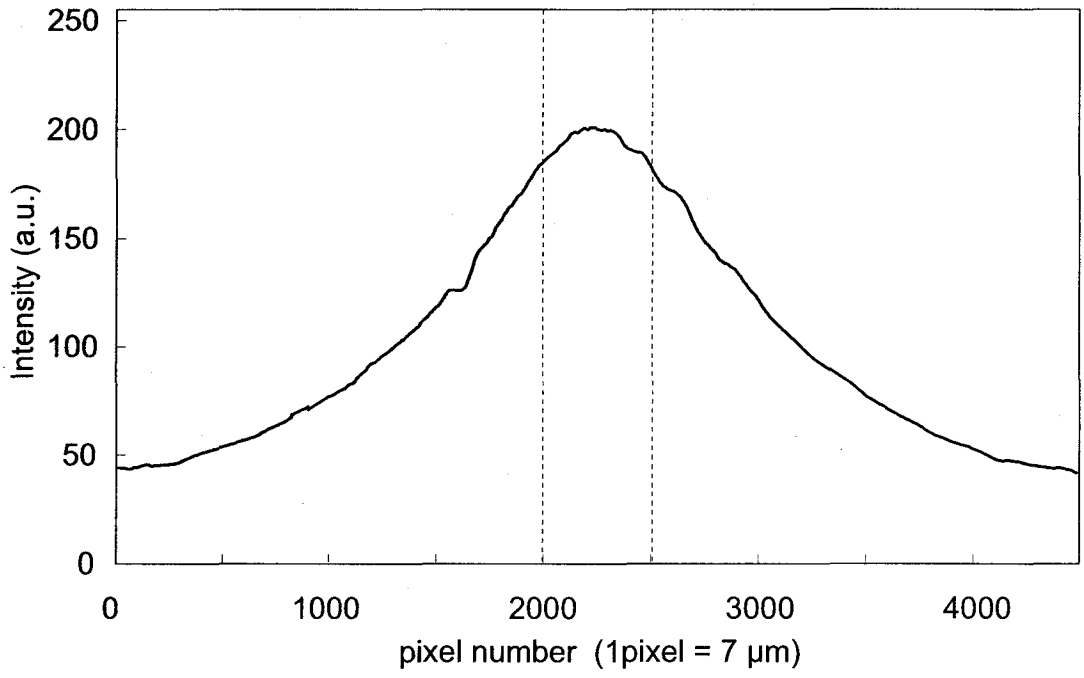


Fig. 3.8 Smoothed laser intensity distribution at sheet beam waist.

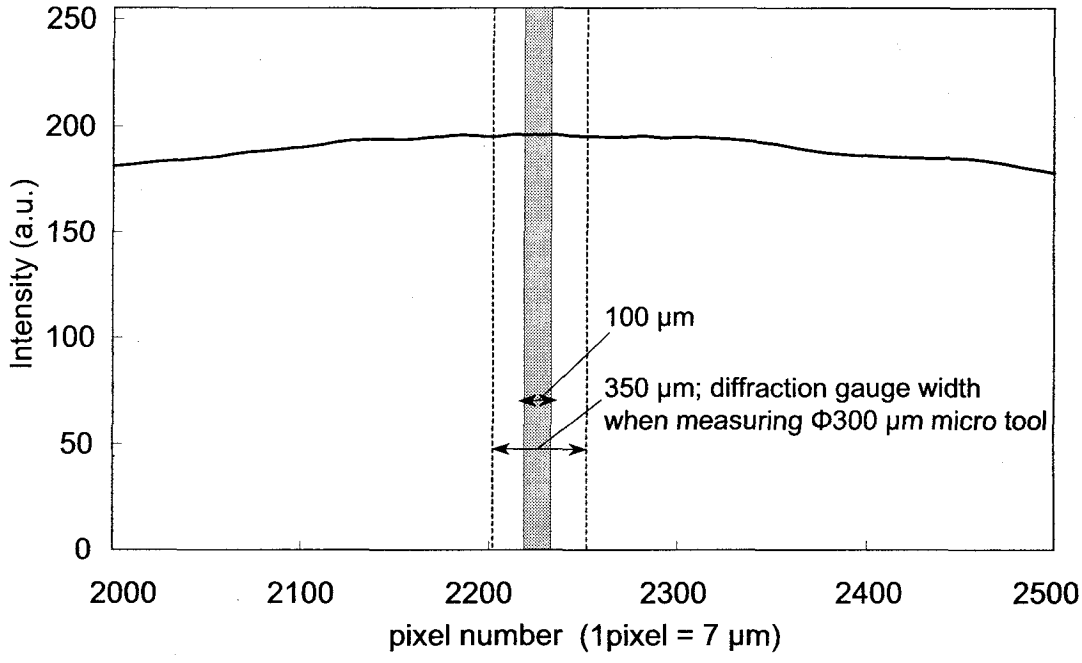


Fig. 3.9 Enlarged intensity distribution of sheet beam, which would be illimunated into edge spacing.

Table 3.1 Specification of beam scan.

Beam Scan：PHOTON,Inc. 製 Beam Scan(Model1180)	
受光部の直径 (mm)	$\phi 4$
受光部のアパーチャー	1 μm×4 mm
Scale Selection	小数点以下第一位 (20 回平均)
Clip Level	13.5%($\approx 1/e^2$)

3.4 結言

光回折パターンによるエッジ間隙測定法に基づき，工具の切れ刃プロファイルを高精度で測定できる光回折ゲージ法を提案し，その提案手法に基づいた測定装置の試作について述べた．測定装置は，全体の大きさは加工機に導入可能な 300 mm 四方である．また，試作した計測システムのシートビームの投光器のレーザの特性を調べ，シートシートレーザビームが 20 μm の厚みを持ち，ビームは扇状に広がるが，エッジ間隙に照射される範囲では平面波の一様強度分布であるレーザビームと見なされることが示された．

第4章　エッジ間隙の測定基礎実験

Measure what is measurable,

and make measurable what is not so.

Galileo Galilei (1564 – 1642)

4.1　緒言

第2章に述べた回折光によるエッジ間隙測定法の理論解析結果を検証するため，まず，構築した基礎実験光学系を用いてエッジ間隙からの回折光強度分布（回折パターン）を観測し，その回折パターンのデータ処理法について述べる．次に，疑似工具（およびねじれ刃小径工具；ϕ 1.8 mm）の切れ刃–ナイフエッジ間隙を変化させて生じた回折パターンを取得し，1次回折光の位置を検出して1次光間隔を求め，理論解析で求められた理論曲線の比較検証を行ない，実験的に測定精度および測定分解能の有効性を示す．さらに高い測定感度が期待されるエッジ間隙が10 μm である場合の測定を試み，本手法の実用測定分解能を求める．

4.2 基礎実験

4.2.1 光学系

図4.1に，本手法である光回折による小径工具切れ刃プロファイル計測の基礎実験光学系の構成を示す．実験装置はフーリエ変換光学系と，回折光強度分布（回折パターン）測定部から構成されている．フーリエ変換光学系は試作した計測システムの条件と同じように，波長650 nmの半導体レーザを光源に用い，投光器のレンズ系によってスリット光に整形し，フーリエ変換レンズとして焦点距離 $f = 100$ mmのレンズを使用する．レーザ光原 (LD素子，LD駆動装置)，投光器およびナイフエッジを被測定工具に接近させて微小間隙を作るために用いたステッピングモータステージ (Stepping Motor Stage) の仕様は付録A.1に示す．

微小間隙で回折したレーザ光は，フーリエ変換レンズの焦点位置（フーリエ変換面）におかれたCCDラインサンサー†によって256階調の回折強度分布として検出される．また，その回折パターンはPCモニタに表示される．

図4.2には，第一の基礎実験において行なわれる，断面が正三角形の疑似切れ刃（すくい角0度，逃げ角30度）と基準ナイフエッジの微小間隙にシートレーザビームが照射されている状態を示す．

† 付録A.1に仕様を示す．

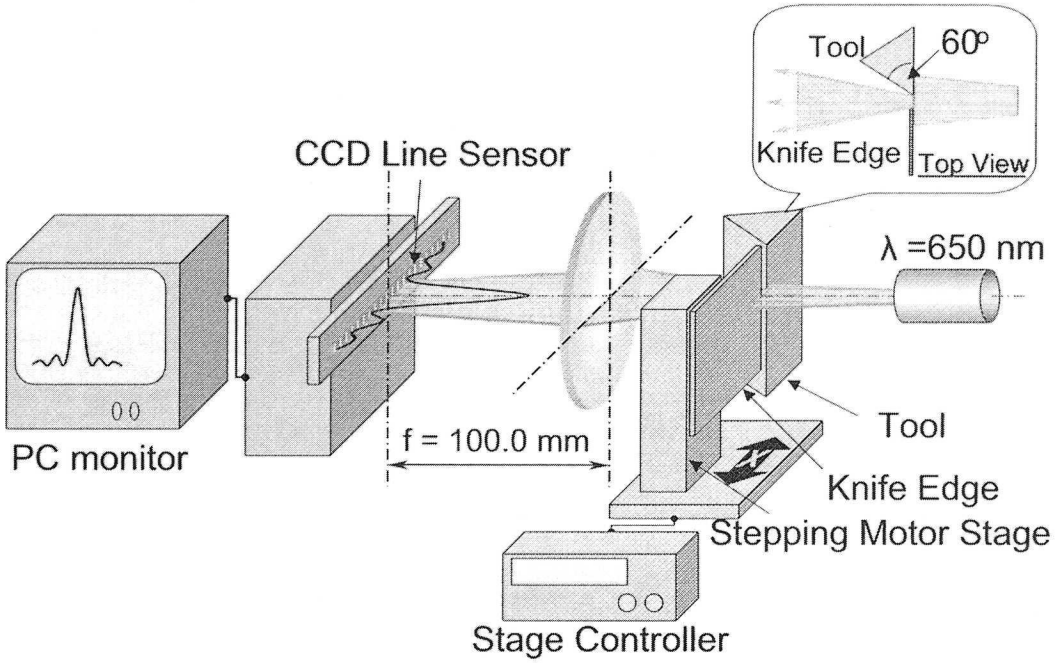


Fig. 4.1 Optical system for fundamental experiment.

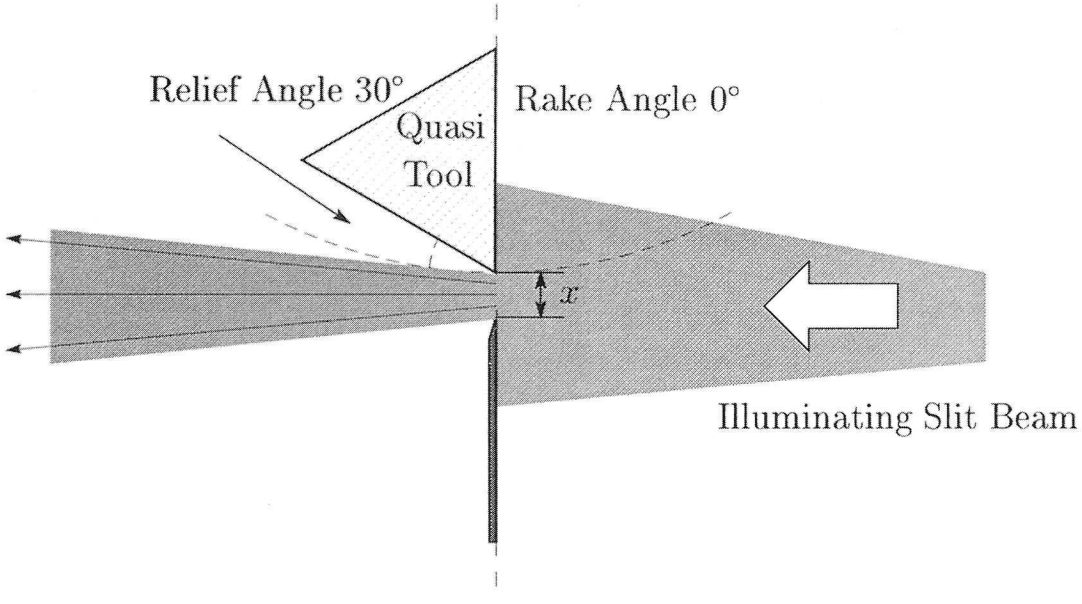


Fig. 4.2 Illustration of the top view section on illuminated position to a quasi tool cutting edge.

4.2.2 疑似切れ刃の光回折パターン

ここで，構築した基礎実験光学系を用いて，疑似工具切れ刃–ナイフエッジ間隙による回折パターンの観測を行なった．一例として，切れ刃–ナイフエッジ間隙が40 μmのときに得られた回折パターンを図4.3に示す．横軸がピクセルナンバーで，縦軸が8bitでAD変換された輝度を表わす．このようにノイズがあったまま1次回折光を検出することはできないため，ノイズを除去する平滑化‡を行なった．その平滑化された回折パターンは図4.4に示す．そして，切れ刃－ナイフエッジの設定間隙xが120 μmから20 μmまでの回折パターンの変化を，20 μmごとに図4.5(a)-(f)に示す．

以上のように，1次回折光のピークを観測できるが，第2章に述べた理論上でも確認された，真中の主極大値の0次光が1次回折光と比べて，非常に大きい(約20倍）ため1次回折光の強度は小さくなってしまう．特に高感度の高い測定が期待される設定間隙が小さいときには，図4.5(f)のように回折光全体がより広くなり，1次回折光の極大値の検出が困難になる．このため，以下の4.3.2項に述べるように真中の0次光を遮光することにした．

‡ 詳細は4.3節に述べる．

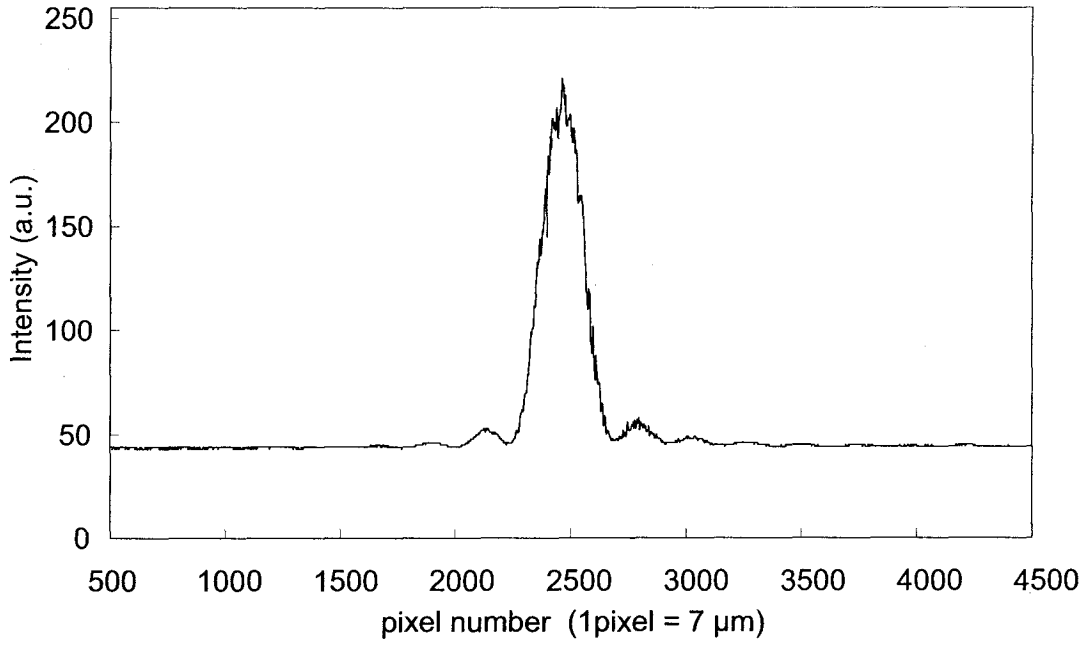


Fig. 4.3 Diffraction pattern at focal plane from linear CCD.

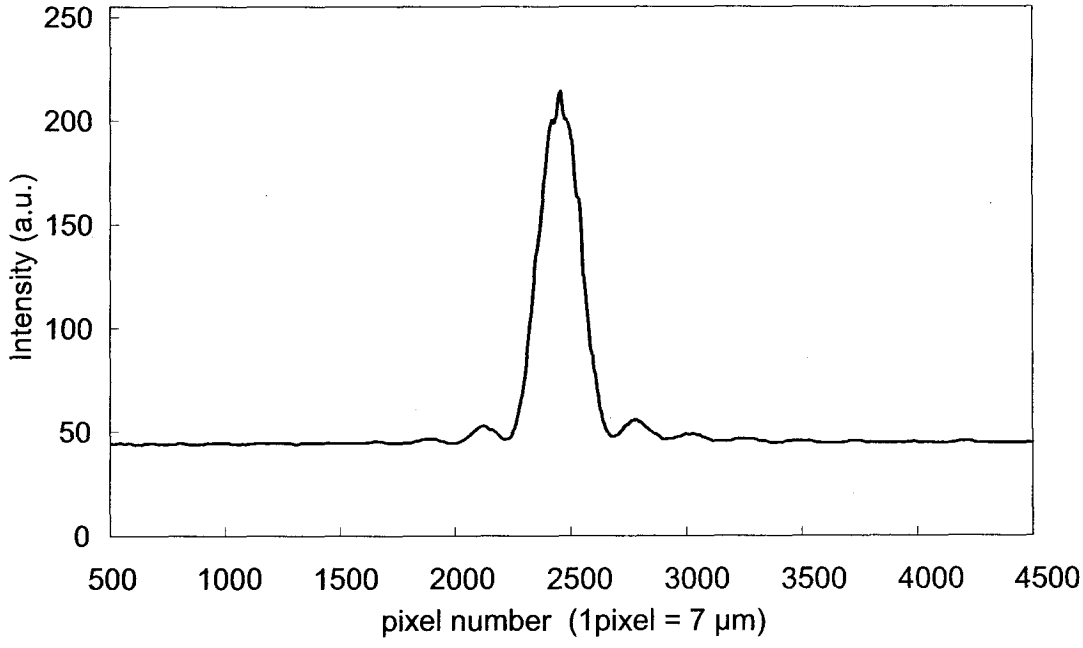
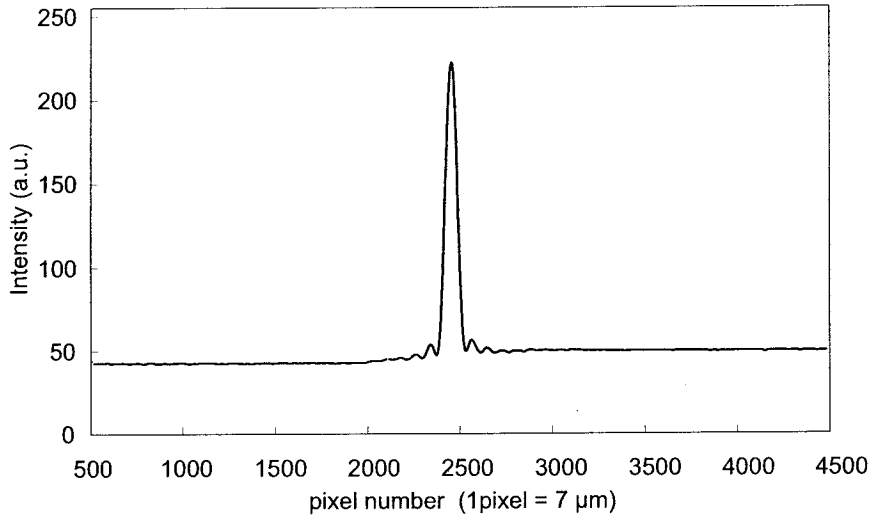
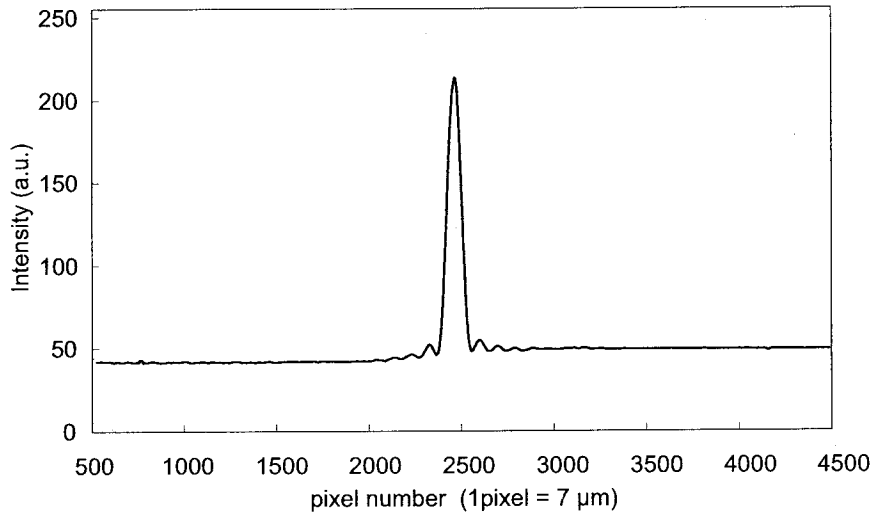


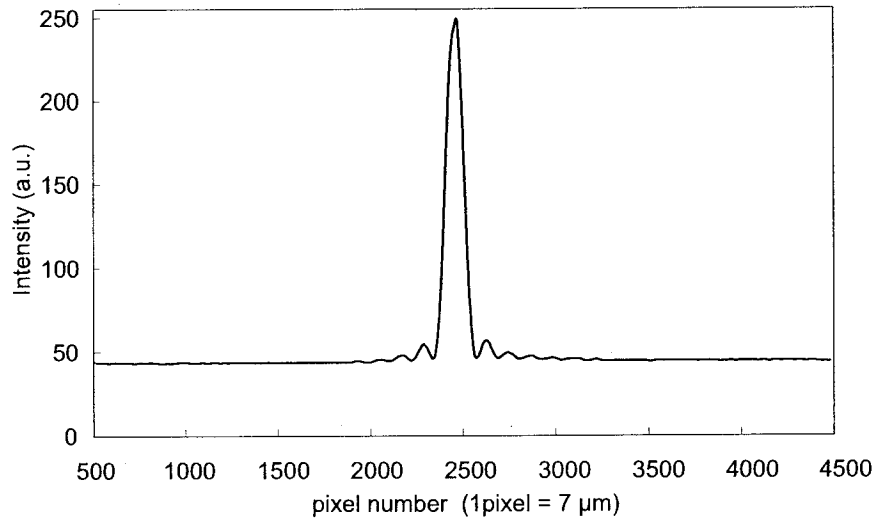
Fig. 4.4 Smoothed diffraction pattern.



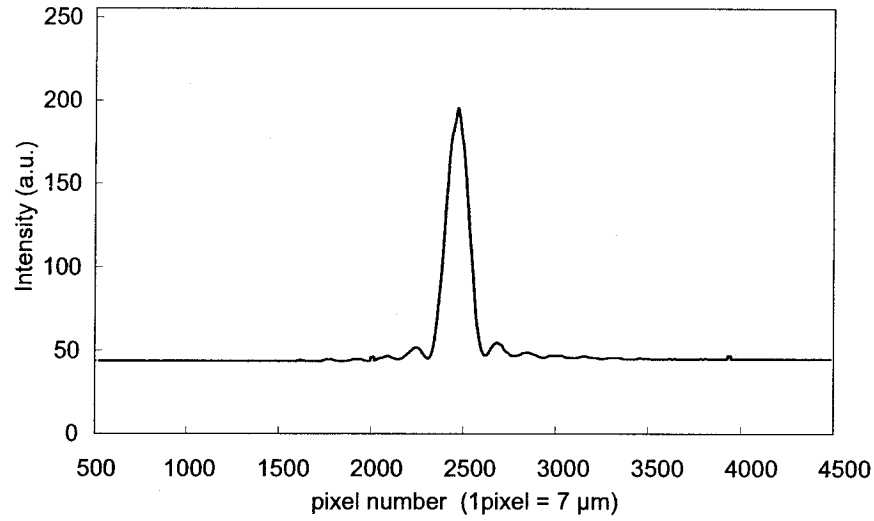
(a) $x = 120$ μm



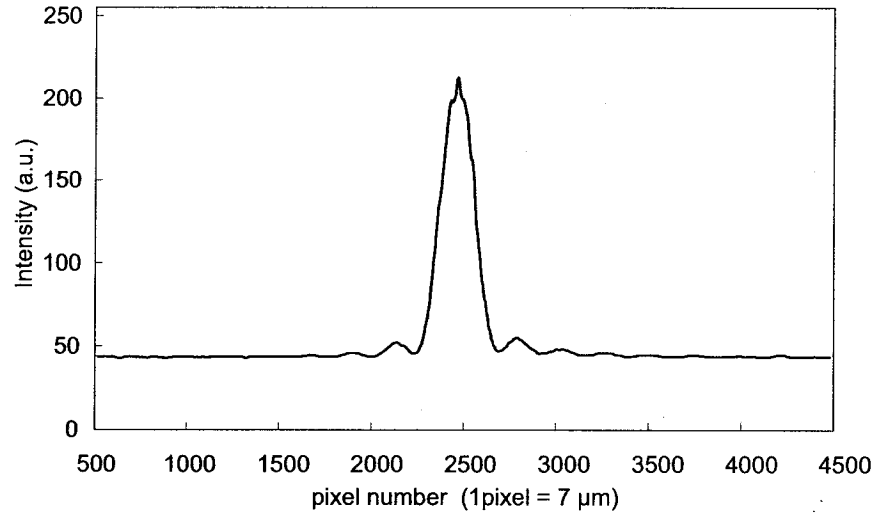
(b) $x = 100$ μm



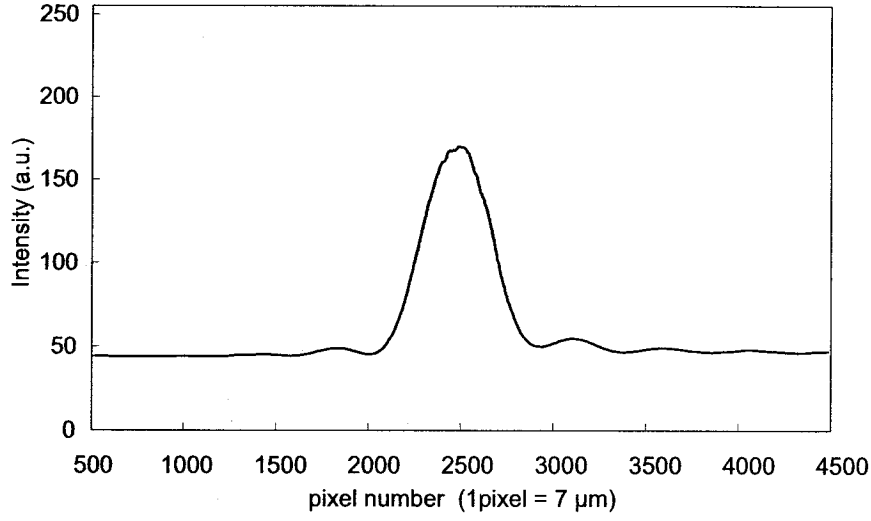
(c) $x = 80$ μm



(d) $x = 60$ μm



(e) $x = 40$ μm



(f) $x = 20$ μm

Fig. 4.5 Changes of diffraction patterns detected when cutting edge to knife edge spacing x is from 120 μm to 20 μm.

4.3 光回折パターンのデータ処理

4.3.1 回折パターンの平滑化（単純移動平均）

測定された回折光強度分布の信号成分(256階調)が，各データ点の近傍で，重み関数として矩形関数を用いたもっとも単純な平滑法（図4.6）を用いて，データ点の雑音除去を行なう[34]-[36]．この方法は，矩形の幅を $N = 2m+1$ とすると，

$$I_{\mathrm{out}}(i) = \frac{1}{N}\Sigma_{j=-m}^{m} I_{\mathrm{in}}(i+j) \tag{4.1}$$

と表される．このように，$N = 19$ で取得した回折パターンのノイズを除去することにする．

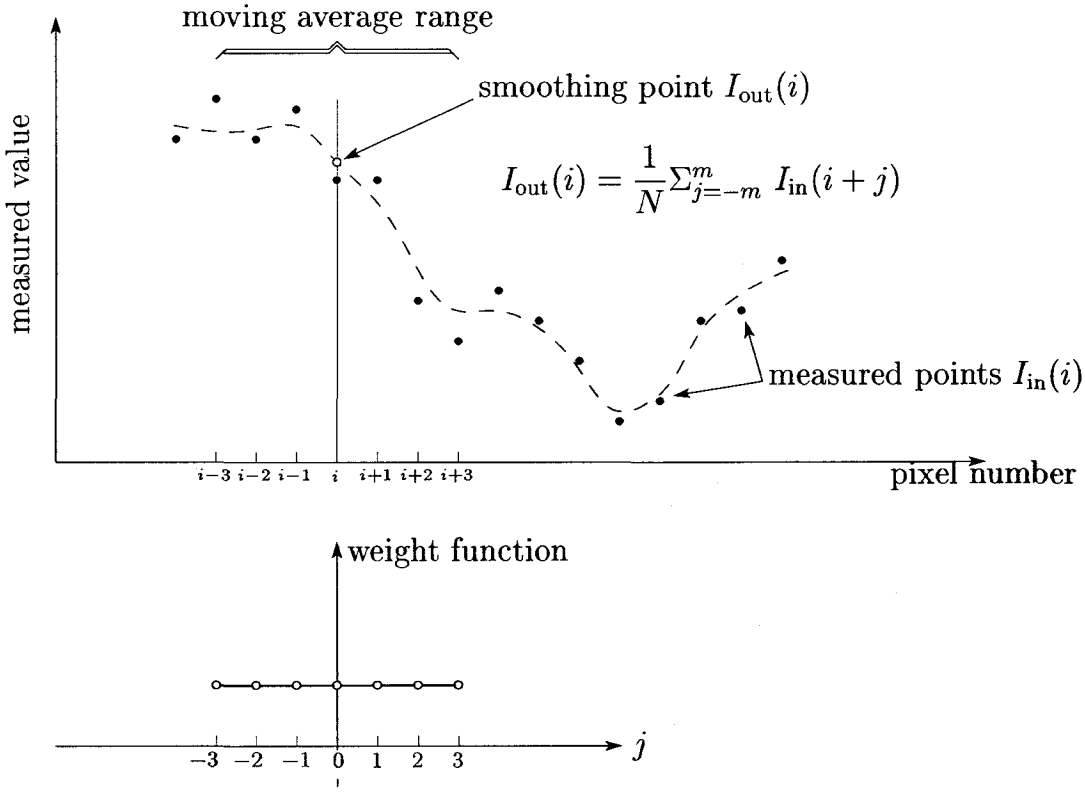
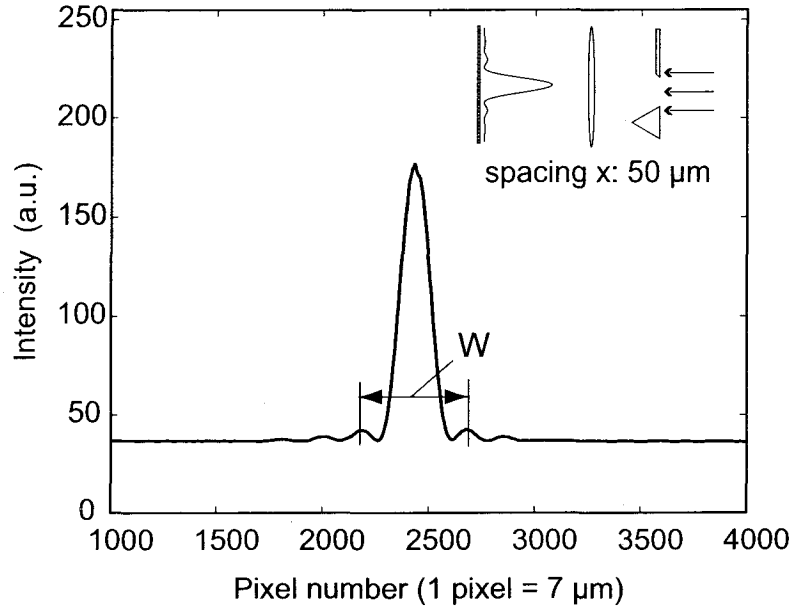


Fig. 4.6 The principle of 7-point smoothing by moving average fitting.

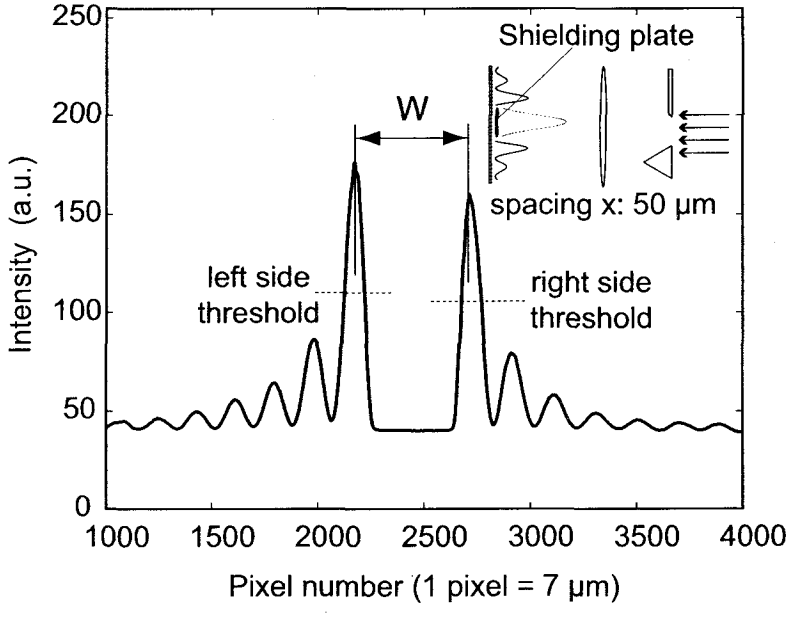
4.3.2 1次光間隔のデータ処理

通常，微小間隙における回折パターンは，高強度の0次光を中心として，その両側に複数の極大値をもつ光強度分布として現われる．図4.7(a)では，一例として，疑似正三角形の工具刃先 - 基準ナイフエッジ間隙が50 μmのときに得られた回折パターンを表している．しかし，1次回折光は0次光に比べ，非常に弱いため（5%），S/N比は悪くなり，高精度に1次回折光間隔 W を検出するのは難しい．そこで，本手法では遮光板をラインセンサの中央部に設置し（図3.2参照）またはPCでの画像処理により，0次光をカットすることによってS/N比の向上を図った．図4.7(b)に示すように0次光をカットすることによって高いS/N比で1次回折光を検出ことができる．図4.7に表した回折パターンは取得した信号の単純移動平均によって平滑化処理を行なったものである．

しかし，工具切れ刃の粗さやレーザの安定性などにより，1次回折光の強度分布には変動が見られ，また切れ刃の逃げ面や他の光学系部品からの散乱・反射光からの影響によって，一部が欠けたパターンとなることが予想される（図4.7(b)の左の1次回折光の頂点のピーク変動など）．そこで，より信頼性の高い計測を実現させるためには，回折パターンの1次回折光ピーク位置の検出を加重平均法[37]によって安定させる必要がある．ここでは，しきい値を左右それぞれのピーク値 I_{max} の60% に設定した．以上のようにして得られた信頼のおける二つのピーク位置によって1次回折光間隔 W を高精度に求めることができる．



(a) With principal peak.



(b) Without principal peak.

Fig. 4.7 Detected diffraction pattern for obtaining the width W.

4.4 切れ刃先端位置測定分解能の検証

光回折ゲージ法の有効性を検討するために，直ぐ刃の疑似工具ならびに，ねじれ刃の実用小径エンドミルを用いた基礎実験を行なった．その基礎実験とは，(0.1 μm 以下の高分解能が得られる）基準ナイフエッジ - 工具切れ刃間隙 x が 10 μm～ 50 μm における回折パターンを取得し，1 次光間隔 W を調べ，理論曲線と比較したものである．それらの測定した結果を図 4.8 に示す．

4.4.1 疑似工具直ぐ刃における測定分解能

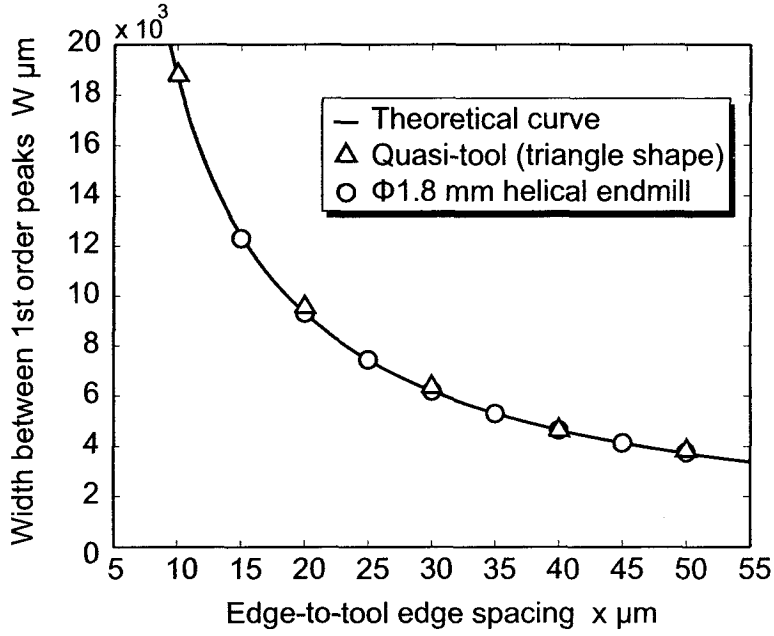
まず，直ぐ刃の疑似工具に対する基礎実験を行なった．被測定対象としては，正三角形柱状の疑似切れ刃（ねじれ角 0 度，逃げ角 30 度，すくい角 0 度）を見立て，基準ナイフエッジとの間隙 x を 10 μm ずつ変化させ，1 次光間隔 W を測定した．その結果は図 4.8(a) の△印で示されている．このように測定値と理論値が良好に一致していることがわかる．

4.4.2 小径工具ねじれ刃における測定分解能

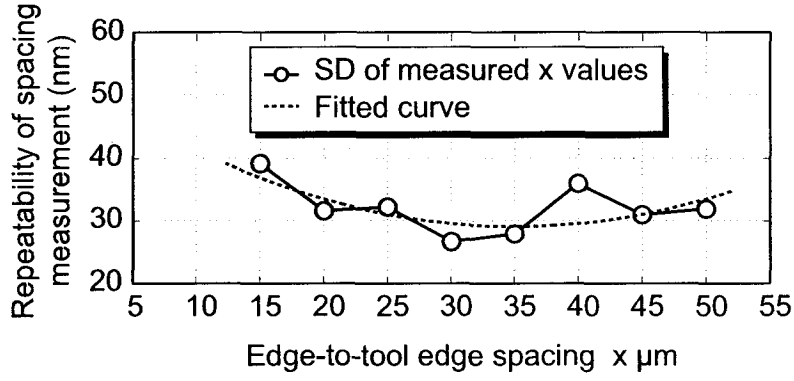
次に，市販の小径エンドミル工具（直径 1.8 mm；ねじれ角 30 度，逃げ角 10 度，すくい角 6 度）の切れ刃に対して，5 μm ずつエッジ間隙を変化させ，同様の実験を行なった．図 4.8 の○印がその結果を示している．このように両種類の切れ刃に対するエッジ間隙の測定結果は，疑似工具と同様に理論値と一致し，ねじれ角の影響は見られない．

4.4.3 繰返し精度

さらに，エッジ間隙測定の信頼性を見るために，ねじれ刃における 13 回の測定値のばらつきを標準偏差（SD）で評価したのが図 4.8(b) である．エッジ設定間隙が 15 μm～ 50 μm の範囲で 40 nm 以下，特に $x = 30$ μm 前後で 30 nm と最もばらつきが小さくなり，高精度計測が可能であることがわかった．



(a) Experimental verifications of a quasi-tool and a helical endmill, in comparison to the theoretical curve.



(b) Measurement repeatabilities for a helical endmill.

Fig. 4.8 Measurement of the measurand width W and their measured value repeatabilities corresponding to the edge spacing x.

4.5 10 μm近傍のエッジ間隙測定可能性の検討

次に高分解能が期待される設定間隙が10 μmにおける回折パターンの変化をさらに詳しく調べた．10 μmの近傍で0.1 μmごとに刃先－ナイフエッジの微小間隙xを変化させて，1次光間隔Wを測定した．その結果を図4.9に示す．このように，実験結果は刃先－ナイフエッジ間隙のばらつき（横軸；標準偏差）が17 nmで，理論曲線とほぼ一致している．測定結果から微小間隙変化0.2 μmに対して，1次光間隔が約400 μm変化していることがわかる．すなわち，感度が400/0.2 = 2000倍であり，CCDラインセンサのピクセルサイズが7 μmであることがら，分解能を計算すると(7 μm/pixel)/2000 = 3.5 nm/pixelの分解能が得られることがわかった．

以上，小径工具に要求されるサブマイクロメートルの精度で切れ刃プロファイル計測が十分可能であることがわかった．

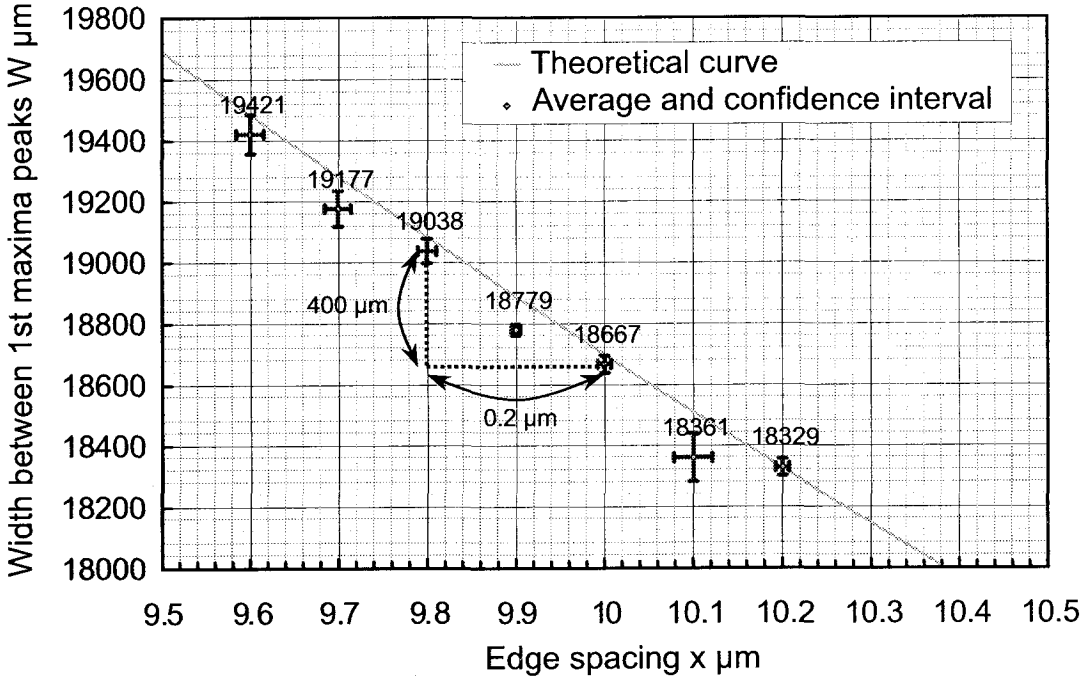


Fig. 4.9 Width between 1^{st} order maxima W when edge spacings are around $x = 10$ μm with 11 times average and their repeatability intervals (2SD).

4.6 結言

以上の計測結果により，レンズの焦点距離 100 mm，シート状レーザビーム厚み 20 μm，ＣＣＤラインセンサのピクセルサイズ 7 μm を用いた試作装置は，工具切れ刃と基準ナイフエッジの間隙を 30 μm 前後に設定することで，測定分解能約 20 nm，繰り返し精度 30 nm で，小径工具切れ刃のオンマシン計測装置として利用できるのもと考えられる．

また，10 μm 近傍のエッジ間隙の検討測定を行なった結果から，本回折光のエッジ間隙は非常に高感度をもっており，エッジ間隙が約 10 μm の場合では，3.5 nm/pixel の測定分解能が得られることがわかった．

第5章　小径工具の切れ刃プロファイル計測

All of the theories in the world amount to little
if there is no ability to apply that knowledge
to make the world a better place.

Karl Marx (1818 – 1883)

5.1　緒言

本章では，第3章で提案した光回折ゲージ法に基づき試作した測定装置を用い，高精度に連続した切れ刃プロファイルの計測が可能であることを示す検証実験を行なう．まず，高分解能な顕微鏡写真との比較が正確に行なえることを考慮し，小径直ぐ刃スロッチングエンドミルを採用する．そのエンドミルの工具径および切れ刃連続プロファイルの測定を試みる．次に，直径1.8 mm のねじれ角を有する小径エンドミルの切れ刃プロファイル測定実験を試みて，ねじれ刃の場合も計測が可能であることを検証する実験を行なう．

5.2 実験方法

上述の試作した実験装置を用いて小径工具の切れ刃プロファイルの測定手順を述べる（図5.1）．まず，本光回折エッジ間隙測定法により，両基準ナイフエッジの微小間隙を校正し，ステッピングステージで被測定工具より少し大きめに間隙ゲージ G を設定する．次に，被測定工具をこの間隙ゲージに挿入する．それから，左右それぞれのエッジ間隙 x_l および x_r を測定し，それらの測定値を確定する．そして，上方に被測定工具を Δy 移動することで，シートビームの走査を行なう．もし，被測定工具の切れ刃形状がねじれ刃であれば，ねじれ刃先端を基準ナイフエッジに合わせるため，工具を微小回転 $\Delta\varphi$ させてから，次の位置の測定を行なう．このように，各位置の工具切れ刃の測定を繰返し，小径工具の切れ刃プロファイルの計測実験を行なう．

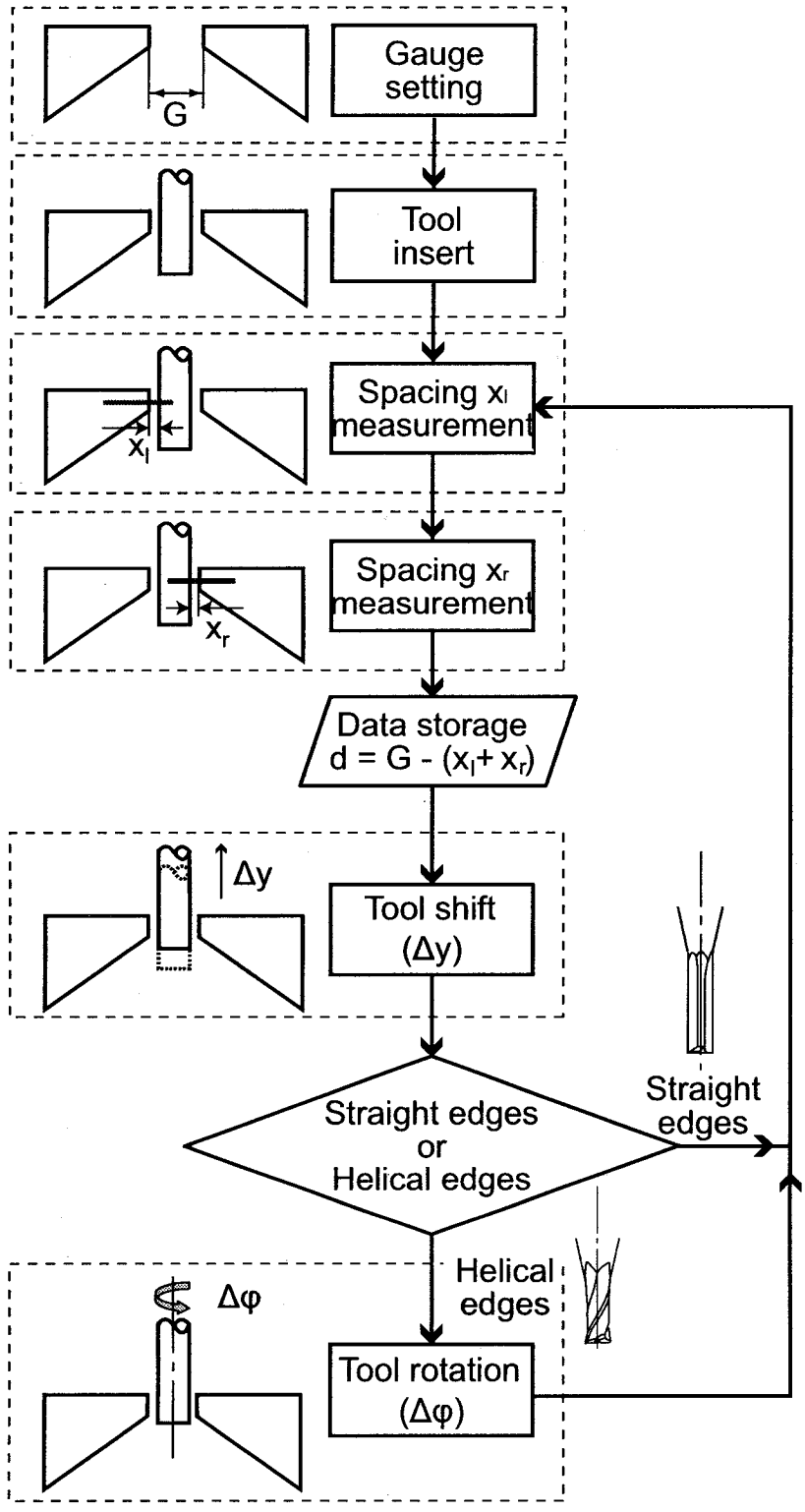


Fig. 5.1 Experimental procedures of tool cutting-edge profile measurement.

5.3 直ぐ刃小径工具の測定

5.3.1 測定手順

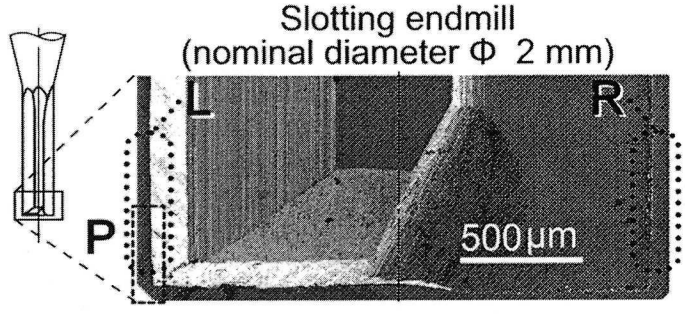
本検証実験で用いた直ぐ刃スロッチングエンドミルは，市販では最小級の直径2 mm で，すくい角6 度，逃げ角10 度の小径工具である．その模式図および顕微鏡写真を図5.2(a) に示す．この工具を光回折ゲージに挿入し，固定シートビームに対して，相対的にエンドミルを上方／下方に移動させ，切れ刃の連続したプロファイル計測を行なった．左右とも，基準ナイフエッジと切れ刃エッジの初期設定間隙は約25 μm としたものである．エンドミルを10 μm ずつ垂直方向にシフトさせ，切れ刃に沿って約500 μm の領域（ L と R ）にわたり，工具径および切れ刃の連続プロファイルを測定した．

5.3.2 測定結果

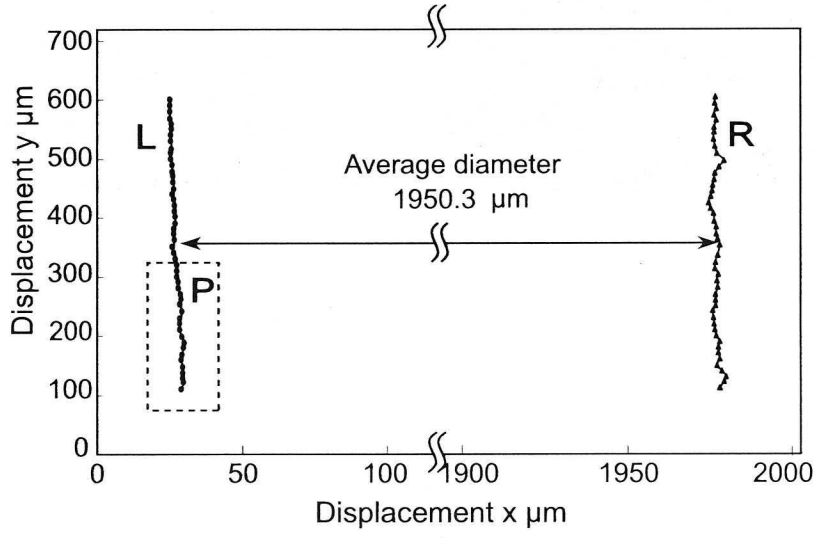
図5.2(b) に測定結果を示す．切れ刃プロファイルにはうねりのような変動が見られ，平均工具径は 1950.3 μm であり，各切れ刃位置における測定値の標準偏差は20 nm 程度であった．

5.3.3 測定精度の検証

図5.3 は，高分解能（7 nm）の走査イオン顕微鏡（SIM）により，切れ刃の詳細観察（P–部）を行なったものである．同じ領域における切れ刃プロファイル測定結果とSIM 観察像を比較すると，切れ刃の微小凹凸は良く一致しており，試作した本測定装置により切れ刃プロファイルが高精度に計測されていることがわかる．



(a) Diagram of a straight flute slotting endmill.



(b) Measurement results.

Fig. 5.2 Profile measurement results of a straight flute slotting endmill, in L and R regions.

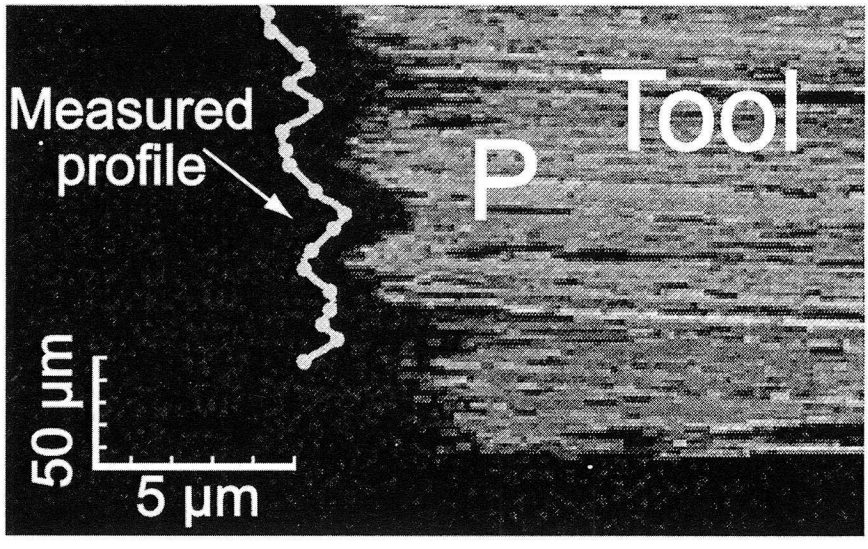


Fig. 5.3 Details of the measured profile comparison with SIM image.

5.4 ねじれ刃小径工具の測定

5.4.1 測定手順

直径1.8 mmのねじれ角を有する小径エンドミル（一般仕様；ねじれ角30度，すくい角6度，逃げ角10度）の切れ刃プロファイル測定実験を試みた．この測定ではまず，工具を微小回転させ，間隙（約25 μmに設定）が最小になる位置を工具切れ刃とみなした．次に，工具をおおよそ20 μmずつ垂直方向にシフトさせ，切れ刃に沿って約600 μmおよび回転角度25度の領域にわたり，プロファイル測定を行なった．

5.4.2 測定結果

図5.4に回折パターンの測定例を示す．ねじれ刃における回折パターンの分布形状には少し非対称性が見られるが，図4.7(b)とほぼ同じであり，垂直なエッジと等価であるとみなすことができる．図5.5にプロファイル測定結果を示す．

5.4.3 測定精度の検証

平均した工具径は1762.8 μmであり，SEMで測定した結果1760 μmとよく一致している．また，標準偏差で定義した工具径の変動は1.8 μm（工具径の約0.1%）であった．この結果，試作した本測定装置により，ねじれ刃小径工具においても高精度計測が可能であることを確認した．

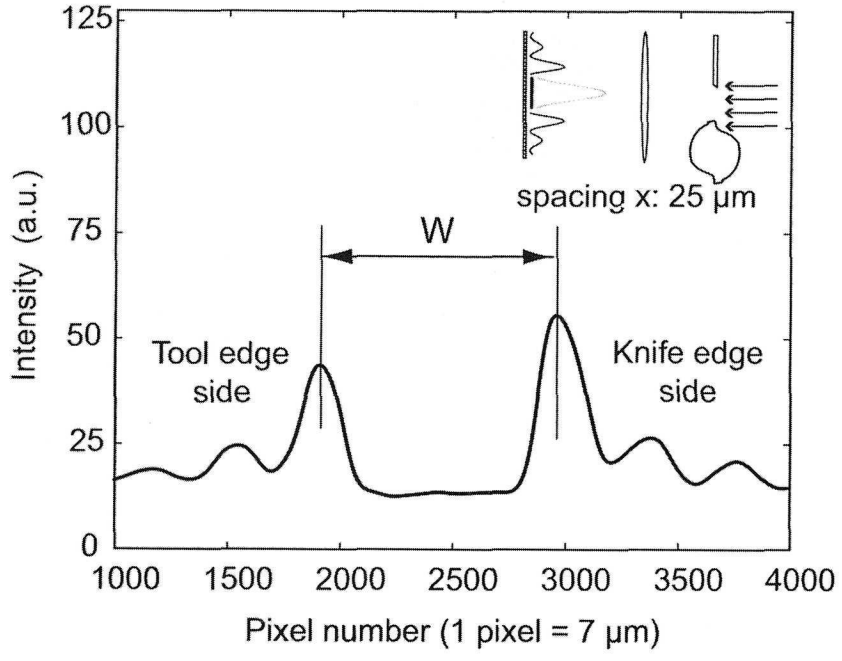


Fig. 5.4 Detected diffraction pattern in measurement of a helical endmill.

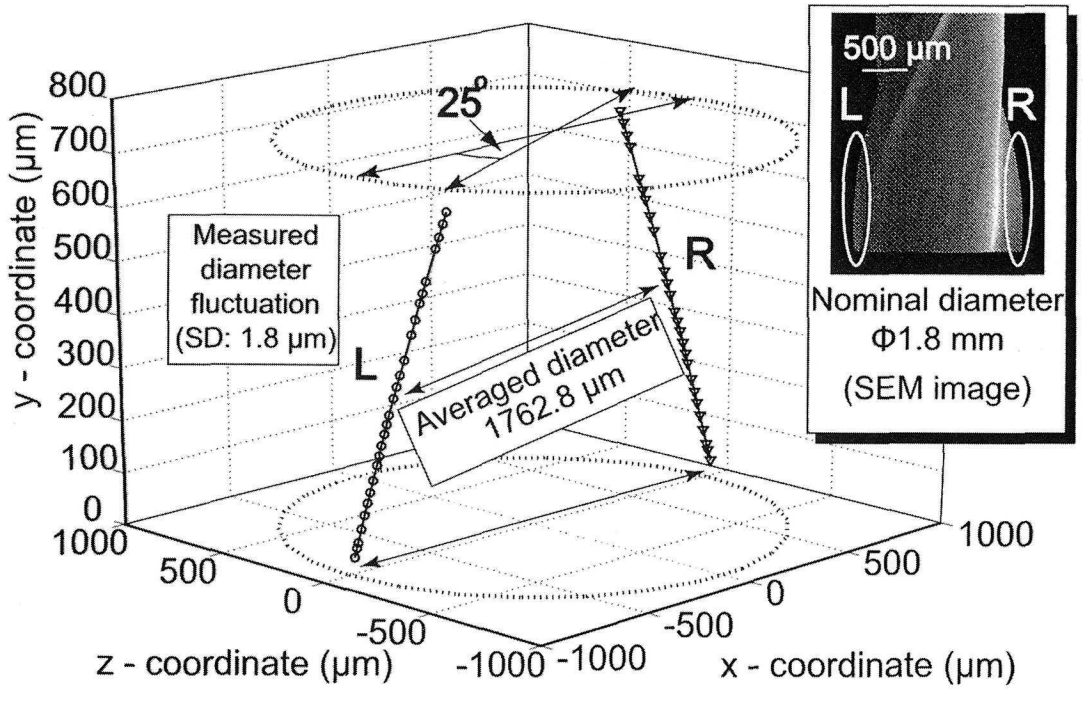


Fig. 5.5 Profile measurement results of a helical flute endmill.

5.5 結言

本章では，試作した測定装置を用い高精度に連続した切れ刃プロファイルの計測が可能であることを示すための検証実験を行なった．まず，高分解能な顕微鏡写真との比較が正確に行なえることを考慮し，小径直ぐ刃スロッチングエンドミルを測定試料として，そのエンドミルの工具径および切れ刃連続プロファイルの測定を試みた．次に，直径1.8 mmのねじれ角を有する小径エンドミルの切れ刃プロファイル測定実験を試みて，ねじれ刃の場合も計測が可能であることを検証する実験を行なった．以上の測定結果をまとめると，次のようになる．

- 光回折ゲージ法に基づいて開発した試作装置は，小径エンドミルの工具径および切れ刃の連続プロファイル計測が可能である．小径ねじれ刃エンドミルにおいても，工具径の0.1% の変動で，三次元プロファイルを計測することができる．

- 高分解能の走査型イオンビーム顕微鏡（SIM）観察像との比較により，本手法は切れ刃の微小凹凸を高精度に計測できることが示唆された．

第6章　極小径工具の摩耗実験

There is no substitute for hard work.

Thomas Edison (1847 – 1931)

6.1　緒言

第5章では新品の小径工具（ϕ 1.8, 2.0 mm）を試料として用いた測定実験を行ない，提案した光回折ゲージ法に基づき，走査イオン顕微鏡観察像と比較した結果，実際に切れ刃の凹凸形状を高精度に測定できることがわかった．そこで，小径工具切れ刃プロファイルを高精度に計測できる光回折ゲージ法のさらなる活用のために，以下のような計測への適用を考える．

- 実際に微細加工に使われているより小さなサイズのツール，特に極小径工具（ϕ 1 mm 以下）などにおける計測が可能であること
- 工具が新品の状態だけではなく，実際切削して摩耗している工具の切れ刃摩耗状態を計測できること
- 切削加工機上，いわゆるオンマシンにおいて工具をチャックに付けたままの状態で計測が可能であること

これらの可能性を検証するために，この章では，まず工具径が1 mm 以下である極小径エンドミル（ϕ 0.3 mm）を選定し，工具摩耗の切削実験を行ない，摩耗極小径工具を計測試料として準備する．次に，その工具を用いて測定間隙をステップ状（0.5 μm）に変化させた応答実験から，切れ刃摩耗の検出分解能を検討する．

6.2 摩耗実験

6.2.1 実験方法

極小径工具

図6.1および表6.1に切削実験に使用される直径0.3 mmの極小径エンドミルの仕様を示す．工具はねじれ角30度の2枚刃で，刃長が最大で0.6 mmの超硬合金エンドミルである．

切削条件

次に，図6.2は極小径エンドミルを用いた摩耗実験の概略図であり，表6.2には切削条件を示している．極小径工具による側面フライスの切削条件として，切削速度38 m/min（回転速度40,000 rpm），送り速度0.0025 mm/刃，半径方向の切り込み量0.01 mmのエアードライによるダウンカットで，工具先端から0.3 mmの切れ刃領域で加工を行ない，1本の工具で摩耗の有無および摩耗量の計測を可能にした．この実験では，摩耗の進行を早めるために被削材として，放電加工における型電極によく使われるグラファイトを採用した．また，工具摩耗の進行過程を計測するため，上記の極小径工具5本を用いて切削長さをそれぞれ0.55，1.10，2.20，3.30，4.40 mに変えて摩耗状態の異なる試料工具を準備した．図6.3に実際の切削加工中の様子を示す．

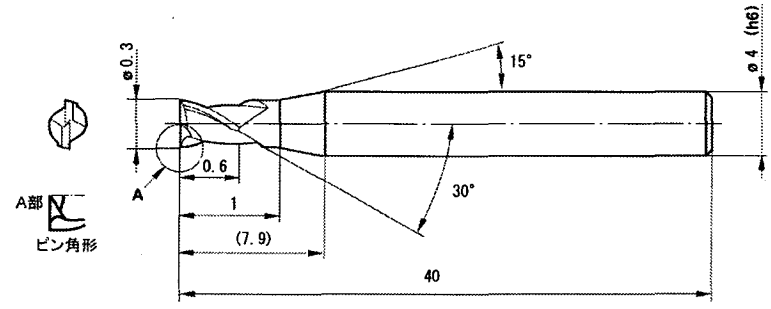


Fig. 6.1 Dimensions of micro endmills used in worn experiment.

Table 6.1 Micro endmill specifications.

Diameter	mm	0.3
Overall length	mm	40
Flute length	mm	0.6 (Max)
Number of flutes		2
Helix angle	deg	30
Shank diameter	mm	4
Tool material		WC Tungsten Carbide

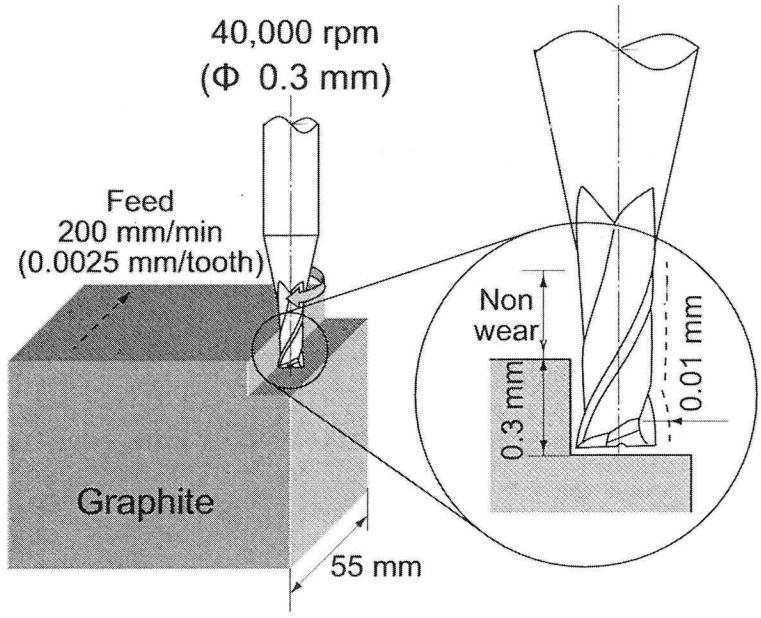


Fig. 6.2 Illustration of side-milling in worn experiment.

Table 6.2 Cutting conditions.

Cutting method		Side milling
Rotational speed	rpm	40,000
Cutting speed	mm/min	38
Feed		200 mm/min
Feed rate	mm/tooth	0.0025
Axial depth of cut	mm	0.3
Radial depth of cut	mm	0.01
Coolant		Dry
Work material		Graphite
Milling length	m	0.55, 1.10, 2.20, 3.30, 4.40 m (5 pieces)
Milling Machine		Makino AG-III & Nihon Seimitsu HS2500

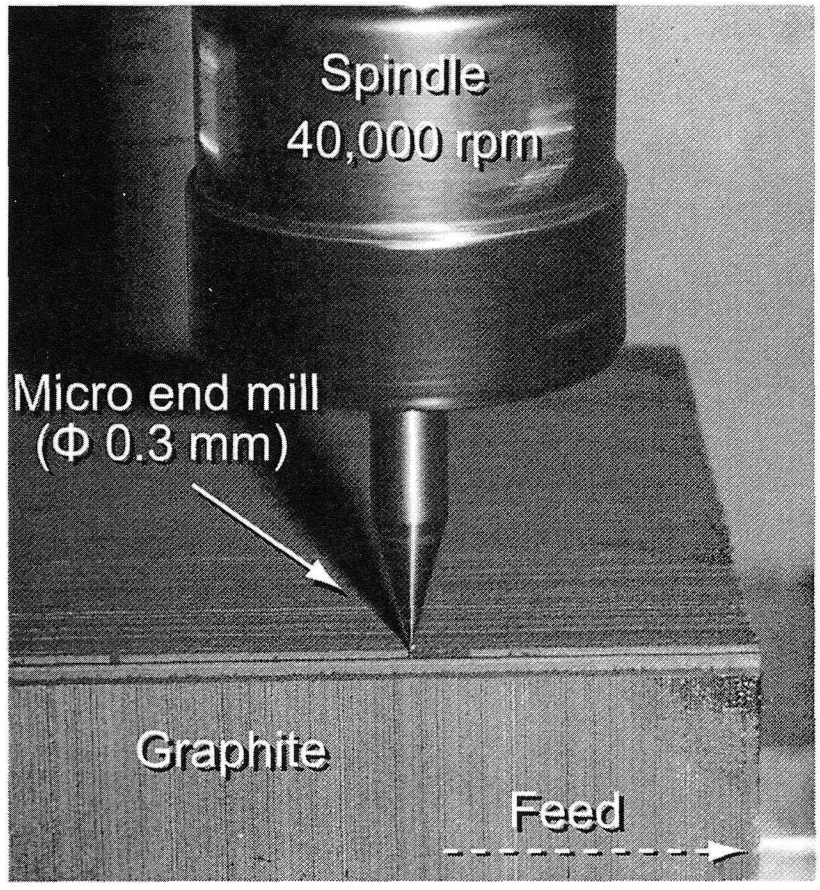


Fig. 6.3 Cutting appearance.

6.2.2 摩耗極小径工具の試料

図6.4に切削加工によって摩耗した，それぞれ切削長さが異なる5本の工具の顕微鏡像を示す．このような工具切れ刃像から切削長さが大きいほど，工具の摩耗が進行している様子が推察できる．しかし，同じ工具でも摩耗の偏りが観察され，右側の切れ刃が大きく摩耗しているが，左側ではあまり摩耗していない様子が確認できる．その原因として切削時の工具回転振れが考えられる．実際，工具を加工機に取り付けた時には工具の回転振れが±5 μm以内に設定するようにしたが，このような極小径工具の切削条件の場合では，半径方向の切り込み量は非常に小さく（10 μm）設定しなければならないため，±5 μmの回転振れであっても主に片方だけの切れ刃で削る可能性は十分にあると考えられる．

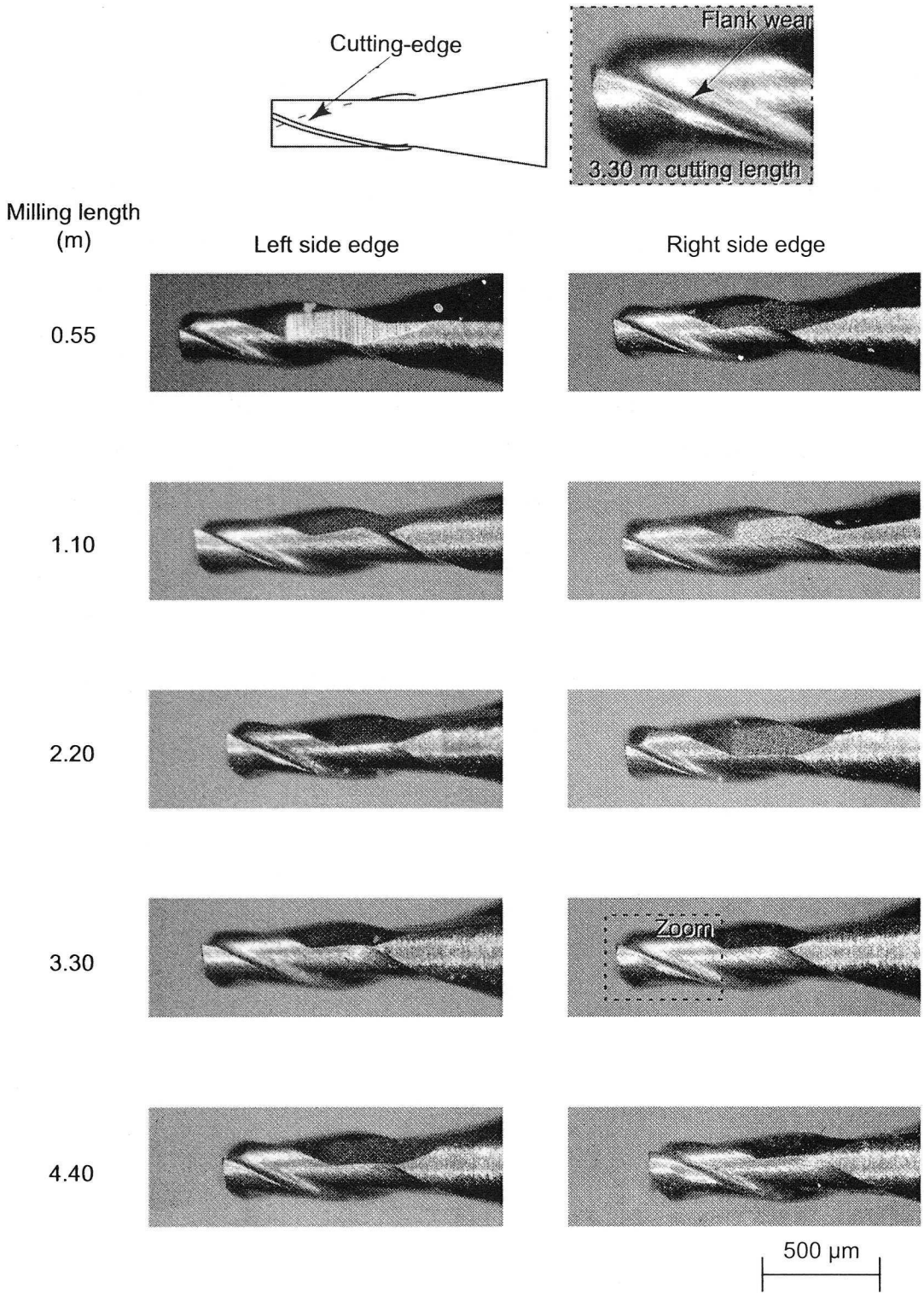


Fig. 6.4 Photographs of micro endmills after cutting.

6.3 切れ刃摩耗の検出分解能

使用した極小径工具はねじれ刃の直径がϕ 0.3 mmと非常に小さいため，切れ刃の曲率は大きくなり，本手法における切れ刃位置の測定精度について検討する必要がある．そこで，切削摩耗実験を行なった極小径エンドミル（ϕ 0.3 mm）の切れ刃に対し，基準ナイフエッジを500 nmずつステップ移動させ†，光回折パターンの1次光間隔により切れ刃–基準ナイフエッジ間隙を測定した．図6.5に測定結果を示す．横軸は測定した回数で，縦軸はエッジ間隙の測定値である．図6.5(a)では，500 nmのステップ応答を表わし，図6.5(b)は測定結果を拡大したものであり，繰り返し精度（測定値の標準偏差の2倍：2σ）は86 nmである．この結果より，500ナノステップの間隙をほぼ5段階に区分できることから，切れ刃摩耗の検出分解能はおよそ100 nmであることがわかった．

† 分解能0.1 μmのステッピングモータステージの精度を踏まえたステップ移動である．

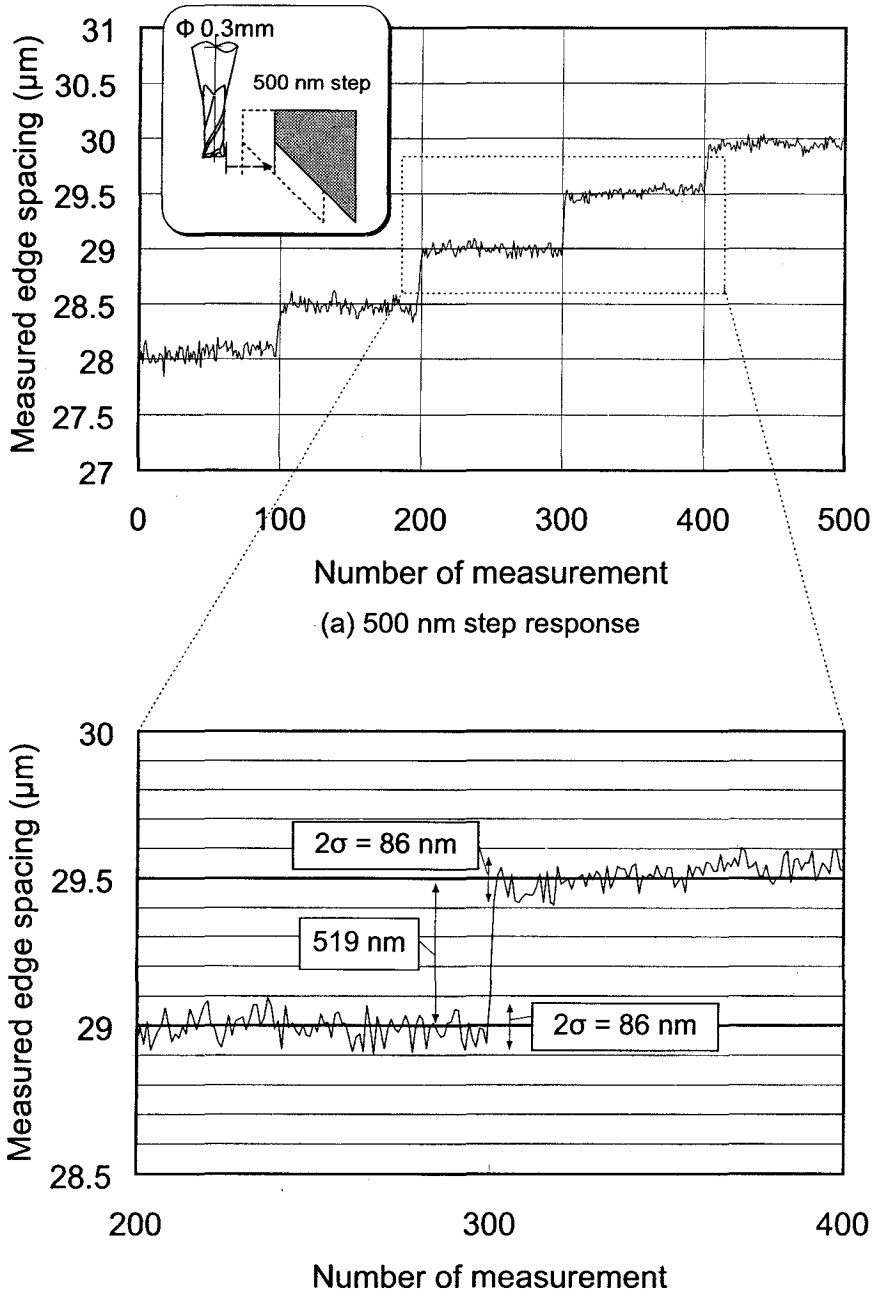


Fig. 6.5 Measurement result of 500 nanostep response.

6.4 結言

本章では，まず極小径工具の摩耗切れ刃の計測試料を準備するためにϕ0.3 mmの超硬合金エンドミルを用いて，グラファイトの切削加工実験を行なった．その結果，切削時の回転振れ（$\pm$ 5 μm）の影響により，切削長さの異なる5本の摩耗工具に，偏った切れ刃摩耗が顕微鏡で観察された．

次に，ねじれ刃の曲率が大きい極小径工具であっても500 nmステップ移動の測定応答実験から，エッジ間隙の変化が0.1 μm以下の分解能で切れ刃摩耗の検出が可能であることを示した．

第7章　極小径工具の摩耗切れ刃位置検出

If your experiment needs statistics,
you ought to have done a better experiment.

Ernest Rutherford (1871 – 1934)

7.1　緒言

本章では，まず提案した切れ刃プロファイル計測法により，極小径工具においては切れ刃–基準ナイフエッジ設定の適切な間隙を検討する必要があると考え，前章の切削実験で準備した極小径エンドミル（ϕ 0.3 mm）を用い，摩耗した切れ刃が測定精度に及ぼす影響を検討し，適切な設定間隙を示す．次に，本手法の特長である切れ刃プロファイル工具のオンマシン計測に適用するための検証実験を行なう．加工機上と同じように工具をチャックに付けたままの状態を再現するため，連続的に工具を自動回転させるように計測システムを改良する．改良した計測システムで，オンマシン計測のように切れ刃位置の自動検出を試みる．また，切れ刃位置の検出結果により，極小径工具の切れ刃位置マップを作り，オンマシン計測における工具を2次元的に投影した切れ刃プロファイルや工具回転振れ測定の有効性を検討する．

7.2 摩耗切れ刃の測定精度に及ぼす影響

7.2.1 回折パターンへの影響

一例として，最も切削長さの大きい4.4 mの工具において，切削する前と切削した後の顕微鏡写真をそれぞれ図7.1と図7.2に示す．切削する前（新品）の切れ刃には摩耗は見られないが，切削長さ4.4 mの加工後では50 μm程度の逃げ面摩耗が観察される．この摩耗工具を用いて切れ刃–基準ナイフエッジの間隙を30 μmに設定して回折パターンを調べた．切削前の切れ刃（図7.3）と切削後の切れ刃（図7.4）における回折パターンを比較すると，左右の1次回折光強度に変化が見られる．すなわち，新品時の工具では切れ刃のねじれ角の影響で工具側の1次回折光の強度がさらに低下しているが，切削後の工具における回折パターンでは工具側の1次回折光強度が大きく低下することがわった．その原因は小径工具（ϕ 1.8 mm）の場合と同じように工具刃先側で生じる1次回折光は刃先の逃げ面によって反射散乱するためと考えられる．さらに，切れ刃が大きく摩耗した場合は，刃先が後退して，より大きな逃げ面を形成し，その刃先の逃げ角は0度近くとなるため，1次回折光がより大きく反射散乱して，刃先側で強度の低い回折パターンになると考えられる[38]．

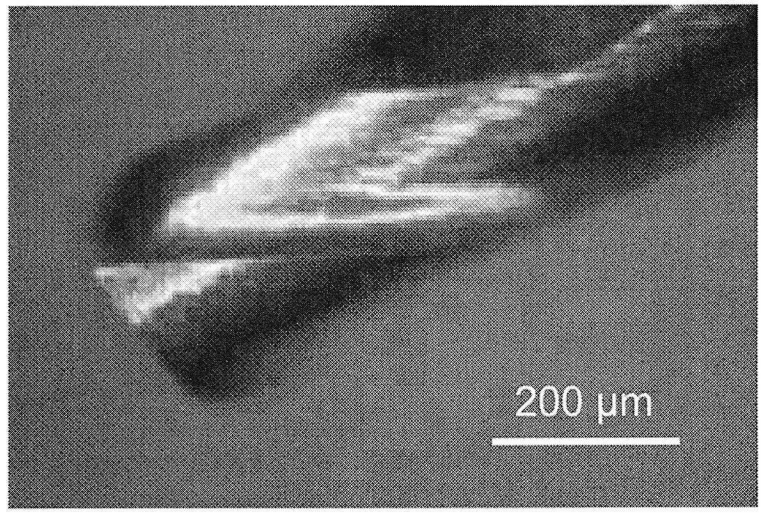


Fig. 7.1 New tool before cutting.

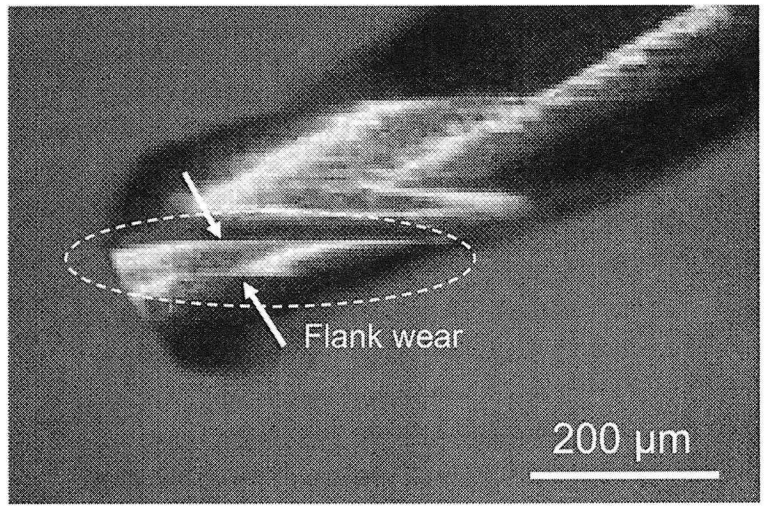


Fig. 7.2 Worn tool after cutting.

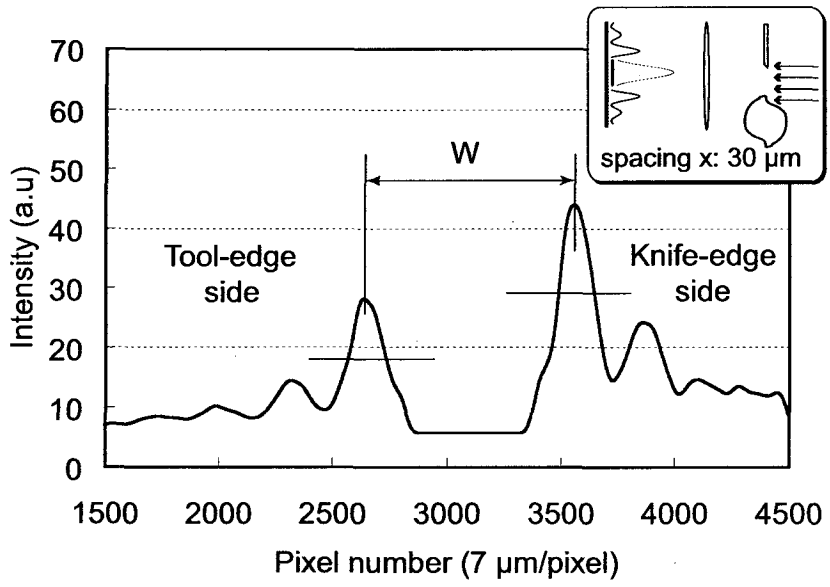


Fig. 7.3 Detected diffraction pattern on new tool.

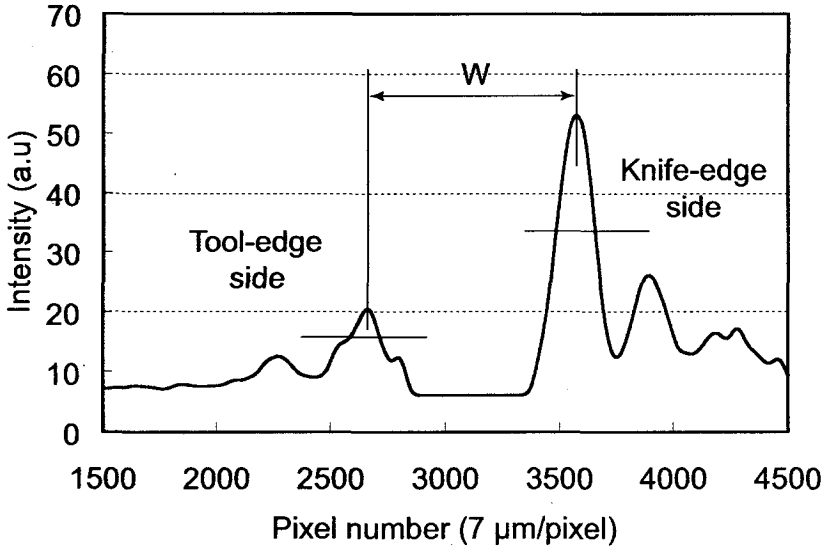


Fig. 7.4 Detected diffraction pattern on worn tool.

7.2.2 エッジ間隙への影響

7.2.1 項で述べたように，光回折パターンの 1 次回折光の左と右で光強度の違いが見られる．そこで，1 次回折光間の距離 W の測定に及ぼす影響，すなわち，設定間隙に対する切れ刃位置の検出精度に及ぼす影響を検討する実験を行なった．この実験では，工具切れ刃に対し基準ナイフエッジとの間隙を 80 μm に設定し，次に基準ナイフエッジをステッピングモータステージで切れ刃に 20 μm まで接近させる．その間，回折パターンの 1 次光間隔によって測定した間隙を縦軸にプロットしたものが図 7.5（切削する前）および図 7.6（切削した後）である．両方の測定結果を比較すると，切削前の工具の場合に測定した曲線は高い直線性を示している．一方，6.2.2 項の切削実験で最も摩耗の大きい工具（切削長さ 4.4 m）の場合に測定した曲線にはうねりが生じており，またエッジ間隙が 20～25 μm では微小変動が見られる．これは，切れ刃摩耗の丸みによる，回折光の反射・散乱の影響であり，とくに 25 μm 以下の狭い設定間隙では，その影響が大きくなるものと考えられる．しかし，30 μm 前後の間隙ではその影響は無視できるほど小さい．したがって，設定間隙を 30 μm 前後に設定することで，測定誤差を小さくすることができる．また，両方の結果を最小二乗法により求めた式では，いずれもその傾きはほぼ 1 と見なされ，間隙測定の校正が可能であることがわかる．

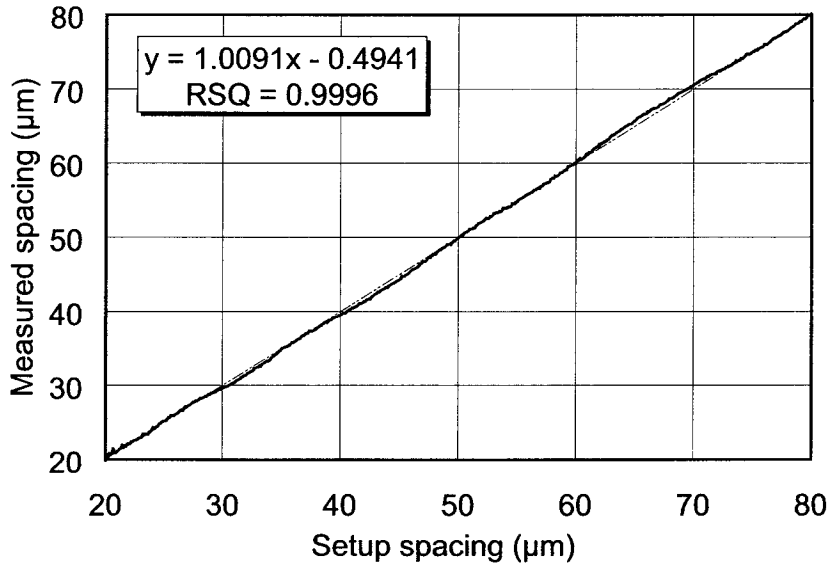


Fig. 7.5 Linearity of measurement for new tool.

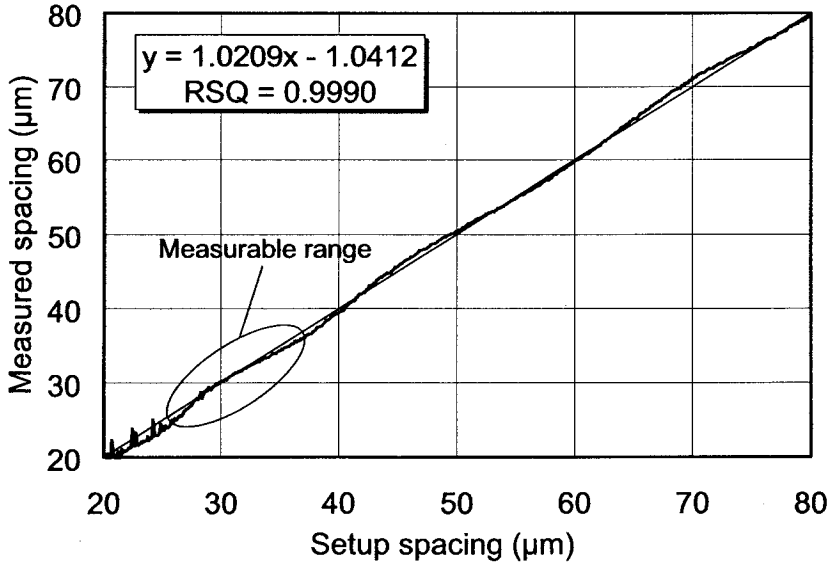


Fig. 7.6 Linearity of measurement for large worn tool.

7.3 切れ刃位置の自動検出

7.3.1 工具回転の電動化

本手法のオンマシン計測に対応できることを検証するために，オンマシンでチャックに付けたままの状態を再現できるように，電動ステッピングモータを付け加えて計測システムを改良した（図7.7）．断面図A-A'のようにモータシャフト軸からの駆動は伝動ベルト系を介して，ローラステージのローラ軸を回す．このようにして工具を連続的に回転させることができる．ただし，モータの歯車ピッチ径は15.28 mm，ローラの歯車ピッチ径は20.37 mm，ローラ径[†]は22.22 mmである．また，被測定極小径工具のシャンク径は4 mmであり，ステッピングモータの最高分解能[‡]は0.00072 deg/パルスであるため，工具回転の分解能は0.003 deg/パルスになる．しかし実際，モータの静止角度誤差や伝動ベルト系のベルトとプーリーの誤差などの検討し難いものが回転精度に大きく影響を与えることから，その工具回転の分解能は参考値とする．改良した計測システムの概観は図7.8(a)に示し，モータが伝動ベルト系によって，工具を連続的に回転することが可能となり，オンマシン計測の再現ができるようになった．図7.8(b)では実際光回折ゲージにϕ 0.3 mmの極小径エンドミルを挿入している状態を表わす．

[†] 付録A.2に参照
[‡] 付録A.2.1に参照

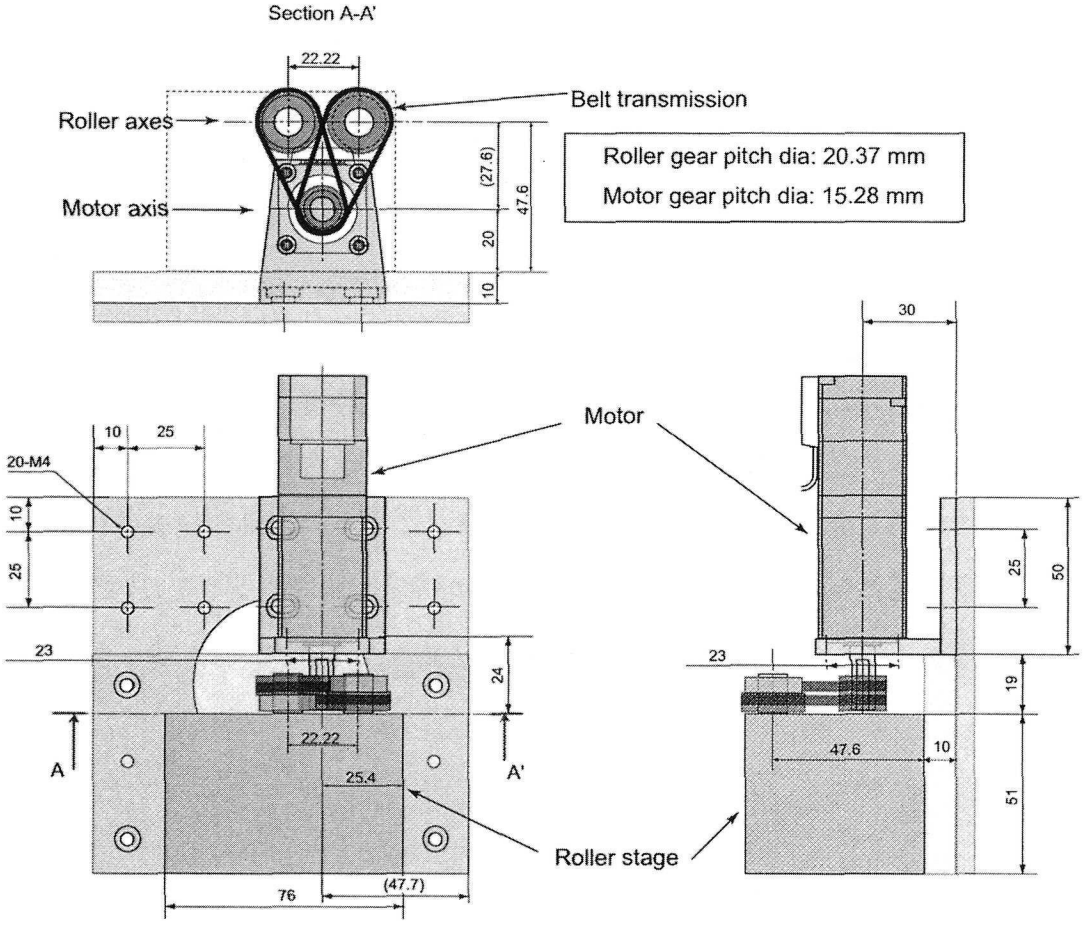
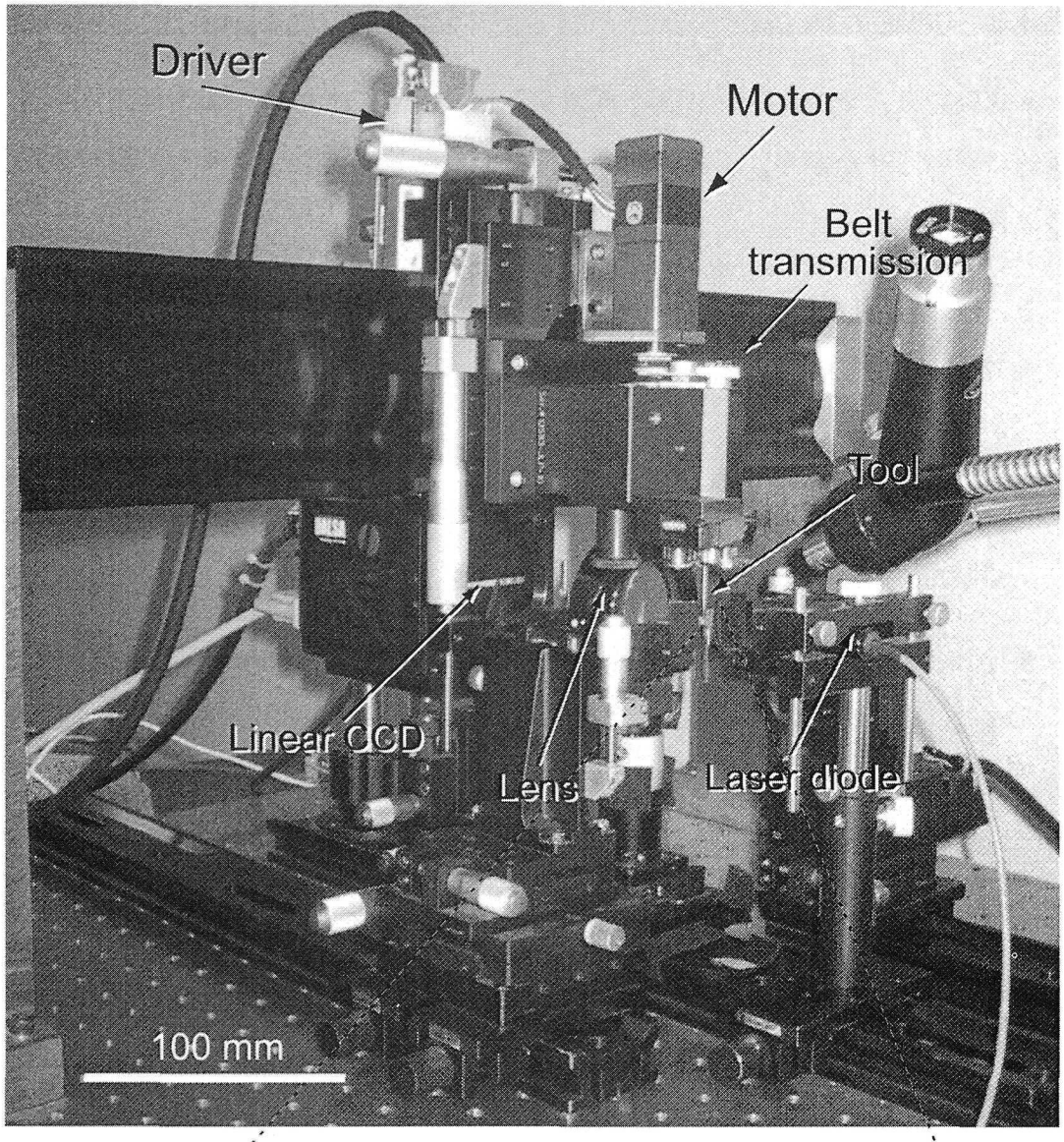
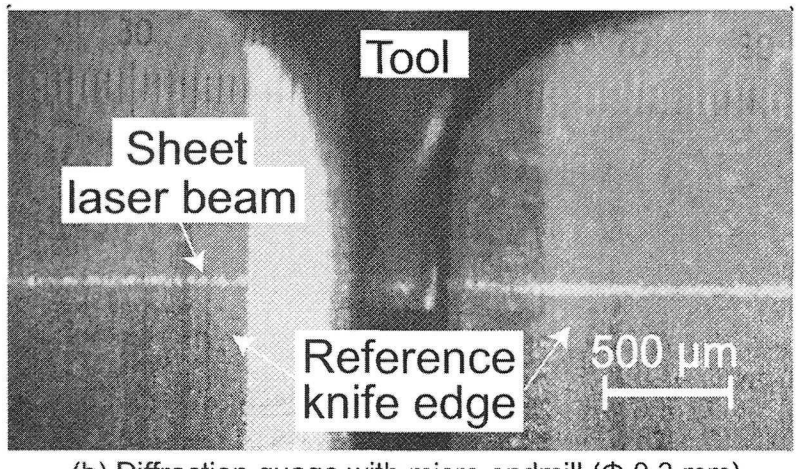


Fig. 7.7 Appending a motor to the roller stage with belt transmission.



(a) Automated measuring apparatus duplicating on-machine measurement



(b) Diffraction guage with micro endmill (Φ 0.3 mm)

Fig. 7.8 Views of developed apparatus with motorized roller stage.

7.3.2 測定方法

本実験では，オンマシン計測を再現する目的として，被測定極小径工具を連続的に回転させながら，工具の切れ刃位置の自動検出実験を試みる．測定手順は以下に示す．

1. 被測定工具の極小径エンドミル（ϕ 0.3 mm，切削長さ 4.4 m）を前項の図7.8(b) のように光回折ゲージに挿入する．

2. 光回折ゲージの右側（または左側）における基準ナイフエッジ–工具切れ刃のエッジ間隙を約25 μm になるように設定する．(今回は右側のエッジ間隙の計測実験を行なう.)

3. 図7.9 の上面図のように工具を回転（回転速度：1.46 rpm）させながら，CCD ラインセンサーによって生じた回折パターンを取得（取得速度：8.73 Hz）し，リアルタイムで連続的に右側の微小間隙 x_r を測定する．この計測実験では約1度ずつエッジ間を測定することになる．

4. 以上の測定手順に基づいて，以下の検討実験を行なう．

   - 工具の高さを固定し，360度回転させたときの工具–基準ナイフエッジ間隙の測定値の振る舞いを調べ，切れ刃先端が検出可能であることを検証する．
   - 工具の1回転に付き，上方に6 μm シフトさせることによってシートレーザビームの走査を行ない，検出された切れ刃先端位置に基づき，工具全体の切れ刃先端位置マップを作成する．

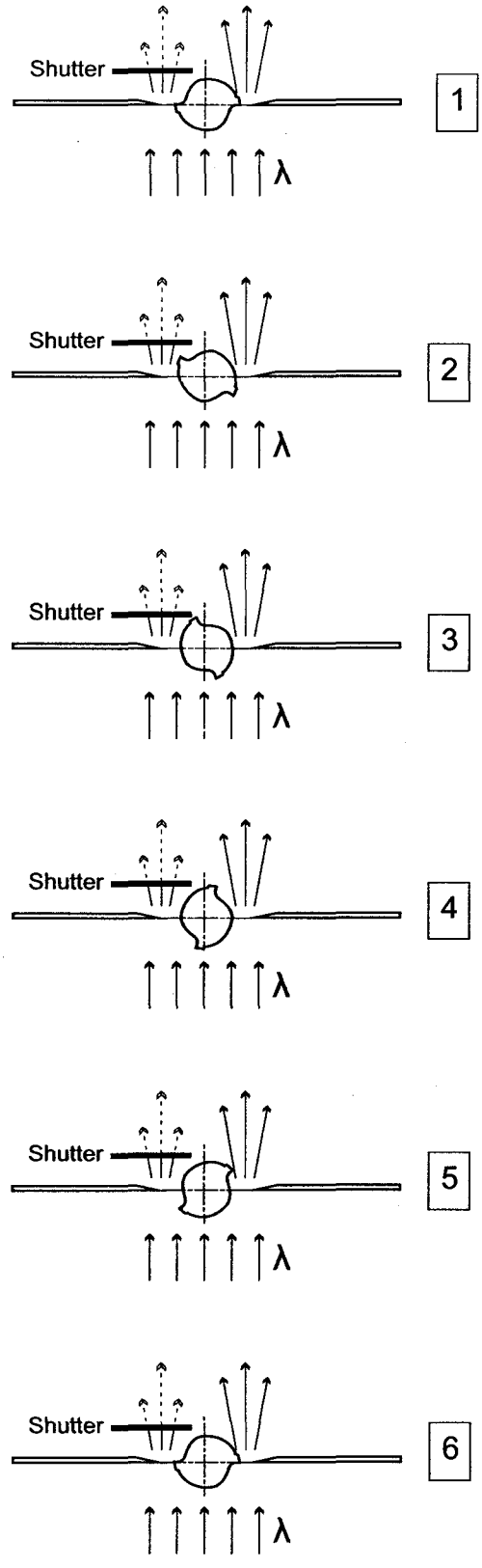


Fig. 7.9 Top view of diffraction gauge among automated measurement.

7.3.3 測定結果

360度回転した工具

工具の高さを固定して一回転させ，その間取得した回折パターンの1次回折光間隔Wから得られた微小間隙x_rの結果を図7.10に示す．横軸はエンドミルの回転角度であり，縦軸はエンドミル–基準ナイフエッジ間の測定値である．谷部は工具切れ刃が回ってきたことを意味しており，基準ナイフエッジとの間隙が最も小さくなっている．図7.10(a)は，第6章の摩耗実験において切削に関与しない工具の切れ刃領域（切削する前の工具とみなす）を測定した結果を示す．1から6までの番号は図7.9中において工具が半回転したときの過程との対応番号を示すものである．測定結果から工具の360度回転に対して，2枚の切れ刃先端位置が2つの局所最小値（谷部）として検出された．その谷部の間は工具の180度回転に対応している．

また，図7.10(b)では，切削実験が行なわれた切れ刃領域における測定結果を示す．谷部が鈍化して，微小間隙x_rも大きくなることから，切削実験によって工具が摩耗したことが推定できる．切削前と切削後の谷部の差は工具刃先が後退した量を示し，刃先の後退摩耗量を計測できることがわかった．片側（R）の刃先後退摩耗が大きく8.8 μmであり，もう片側（L）の刃先の後退摩耗が小さく1.5 μmであることが本自動切れ刃位置検出実験で計測された．その違いは，切削時の工具回転振れによるものであると考えられる．

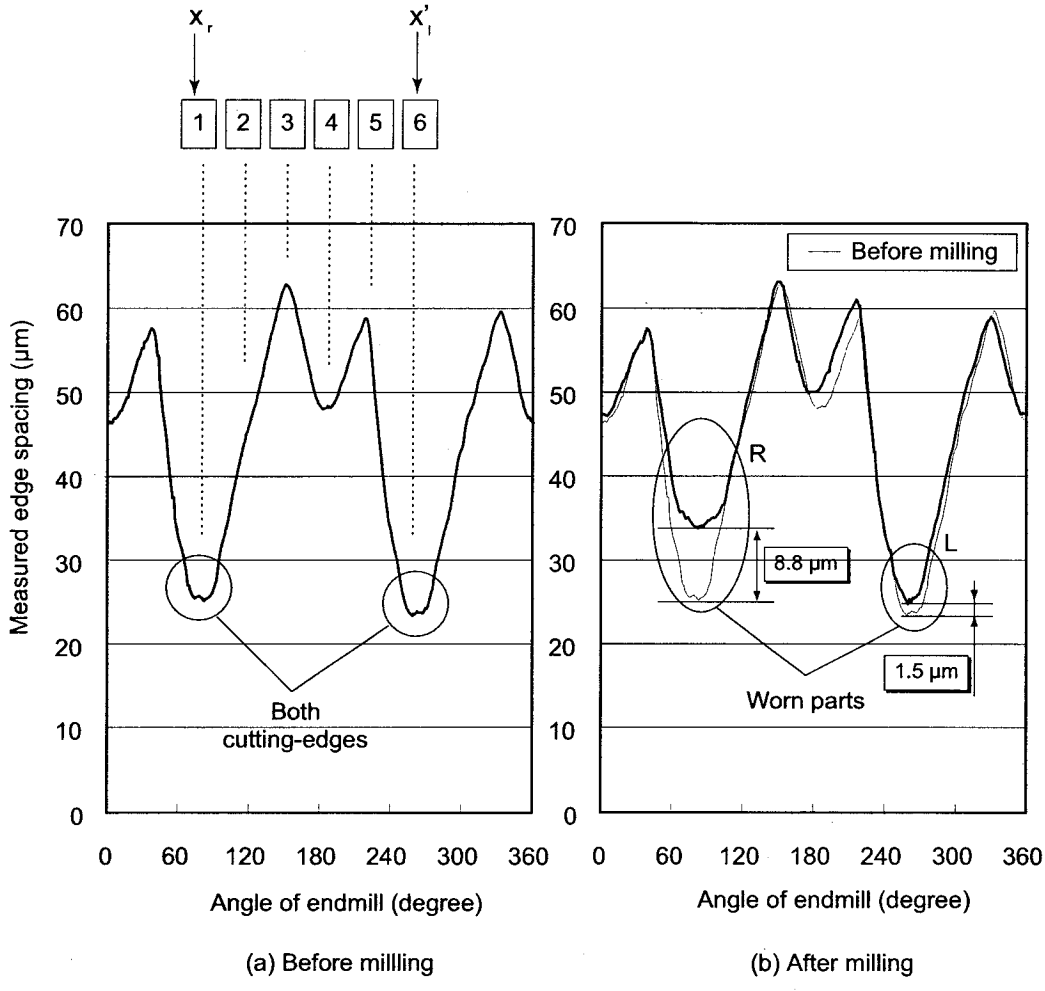


Fig. 7.10 Two valleys show position of cutting edges (a), (b); comparison of measured edge spacing between new tool and worn tool(b).

シートレーザビームの走査測定

次に工具の一周回転毎に，6 μm程度（工具とローラステージとの回転状態により± 1.5 μmのばらつきをもつ），工具を上方にシフトさせながら，シートレーザビーム走査を行ない，前項と同じように切れ刃自動検出を行なった結果を切削長さ3.30 mの摩耗工具のものを例にとり，図7.11に示す．横軸は微小間隙を測定した回数または工具の回転角度であり，縦軸は測定した微小間隙xである．はじめにそれぞれの初期間隙として，左側および右側の微小間隙$x_l(y_0)$, $x_r(y_0)$を測定した結果を示す．次に，工具を連続的に回転させながら（図中のA–B–Cの過程にともなう）微小間隙を測定した結果を示す．Aでは切削に関与しない切れ刃の上部であり，Bからは切削により摩耗したと見れる領域に入り，Cではシートビームの一部が工具に当たらなくなりはじめ，測定値の乱れが著しくなり，工具の先端を意味している．また，領域B～C間では鈍化した谷部の刃先後退の偏りにより，$x'_l(y)$と$x_r(y)$に差が見られ，片側の摩耗が大きくなっていることが明らかである．

この測定結果により，谷部の値を図7.11のように$x_r(y_1), x_r(y_2), \ldots$検出して，$x_r(y)$および$x'_l(y)$の曲線マップが得られた．これらの曲線マップは切れ刃2枚がそれぞれ回転している状態の刃先位置を表わし，一般の加工機の回転系なら一回転すると振れは元に戻り同じ振れ状態を繰り返すことから，この曲線マップは2枚刃それぞれの2次元的に投影した切れ刃プロファイルそのものを意味する．しかし，試作した計測システムでは工具に対して芯無しのローラステージを使うことで，一回転毎に異なった振れ状態を示すため，得られた曲線は工具回転振れを含めた測定結果となっている．

また，測定結果の領域Iにおいて，切れ刃の谷部（図7.10(a)の4番）は，エンドミル製作時に生じた切れ刃溝のエッジ（SEM観察像のIの領域）を表わしている．切れ刃の上部になるにしたがってエッジは大きくなり（領域I'），逆に工具先端に向かってほぼ一定になっている．一方，領域IIに入ると，測定結果が突然大きく変動（測定結果の領域II）しているのは，切り屑を排除する溝の影響であることがわかる．

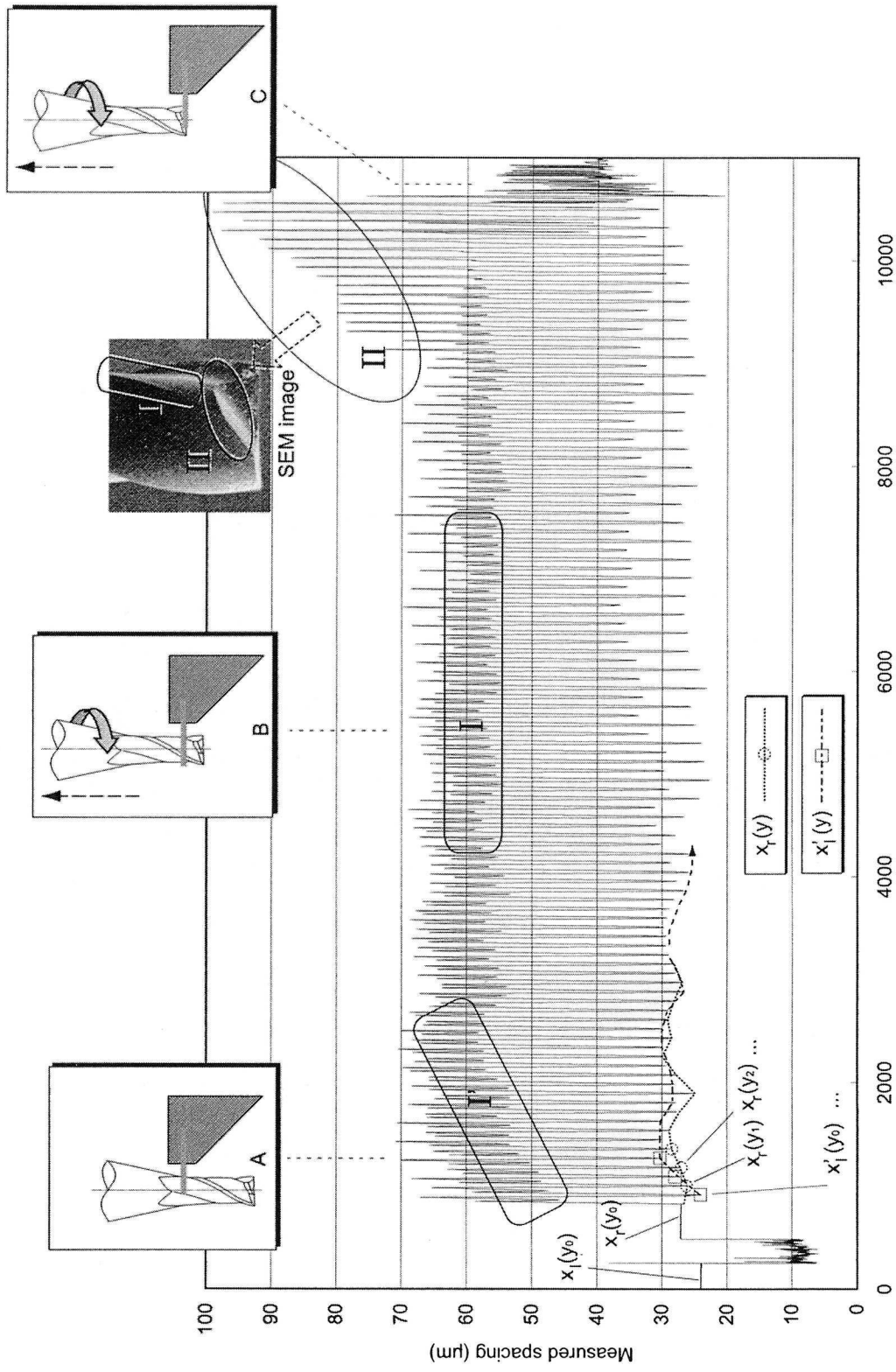


Fig. 7.11 Automated measurement result.

切れ刃位置マップ 図7.12は図7.11における自動検出された切れ刃位置マップを示す．光回折ゲージの既知の値Gの間に高さ方向yによって，測定された切れ刃位置をマップしたものである．切れ刃位置曲線には回転振れが含んでいることから，測定した切れ刃位置x_r曲線とx'_l曲線は実際の切れ刃位置$\mathfrak{X}$と振れϵの和であり，以下のようになる．

$$x_r(y) = \mathfrak{X}_r(y) - \epsilon(y) \tag{7.1}$$

$$x'_l(y) = \mathfrak{X}'_l(y) + \epsilon(y) \tag{7.2}$$

ここで，はじめに測定した$x_l(y_0)$の初期測定値を利用して，求めた$x'_l(y)$により，

$$x_l(y) = x_l(y_0) + [x'_l(y_0) - x'_l(y)] \tag{7.3}$$

$$= [x_l(y_0) + x'_l(y_0) - \mathfrak{X}'_l(y)] - \epsilon(y) \tag{7.4}$$

$$= \mathfrak{X}_l(y) - \epsilon(y) \tag{7.5}$$

である．

以上のようにオンマシン計測の再現において，被測定極小径工具が回転している状態で切れ刃の位置を自動検出でき，回転中の工具切れ刃プロファイル位置を投影して2次元的に計測することができた．

さらに，図7.11の測定結果における横軸の角度情報を利用すれば，回転軸に角度センサーが必要なく3次元の切れ刃プロファイルを描くこともできる．しかし，本計測システムの回転系独自の回転振れ特性により，それについて検討を行なわないことにし，次の第8章で工具回転振れの影響を受けずに三次元切れ刃プロファイルを測定することで，本計測手法の有効性を示す．

回転振れの測定　ここで，工具回転の振れ量測定について述べる．工具の中心は，同じ刃先が半回転したとき，元の刃先位置と現在の刃先位置の中間位置 $c(y)$ が中心位置である．このことから，はじめに測定した $x_l(y_0)$ と，工具が半回転したときの位置 $x'_l(y_0)$ との中間値 $c(y_0)$ が求まる．次に，$c(y) = c(y_0) + \epsilon(y)$ であることから，振れ量 ϵ は下式のように両方の切れ刃位置変化量の平均値をとることにする．(ただし，$n = 0, 1, 2, 3, \ldots$ である．)

$$\epsilon(y_n) = \frac{x'_l(y_n) - x'_l(y_0)}{2} + \frac{x_r(y_n) - x_r(y_0)}{2} \tag{7.6}$$

$$\epsilon(y_{n+\frac{1}{2}}) = \frac{x'_l(y_n) - x'_l(y_0)}{2} + \frac{x_r(y_{n+1}) - x_r(y_0)}{2} \tag{7.7}$$

切れ刃半径の変化があまりないと思われる図 7.11 の領域 A における測定値を上式に代入して，工具の中心位置を求めたのが図 7.13 である§．図 7.13 は工具の中心位置を示し，工具回転振れ量は 11 回転で 2 周期して約 $\pm$ 2 μm と推察される．ローラステージの仕様と同じ程度の振れ量を測定したことから，本計測システムの振れ量計測の有効性を示した．

§ 工具が回転に伴い，位置が上方にシフトしているので，仮想的に高さが一定のような測定をする目的のためである．

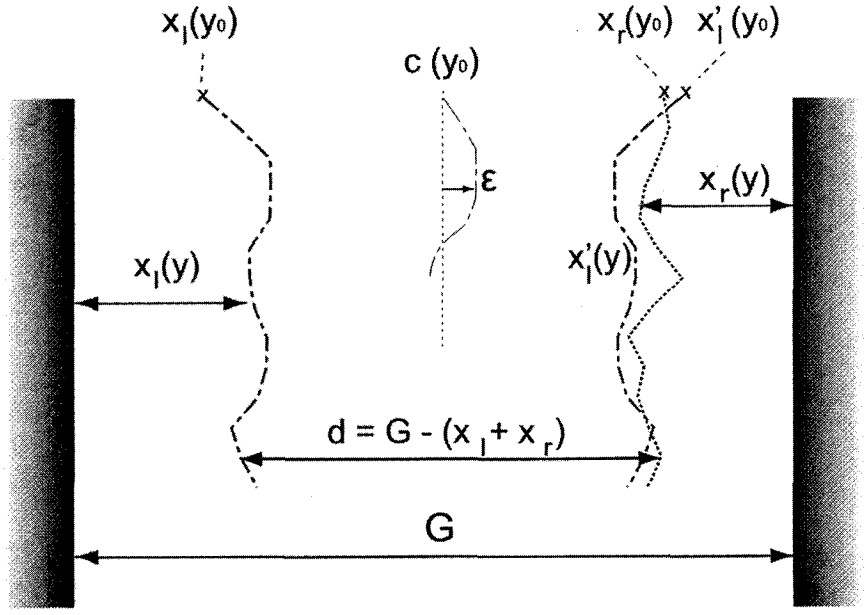


Fig. 7.12 Automated measurement results with rotation runout.

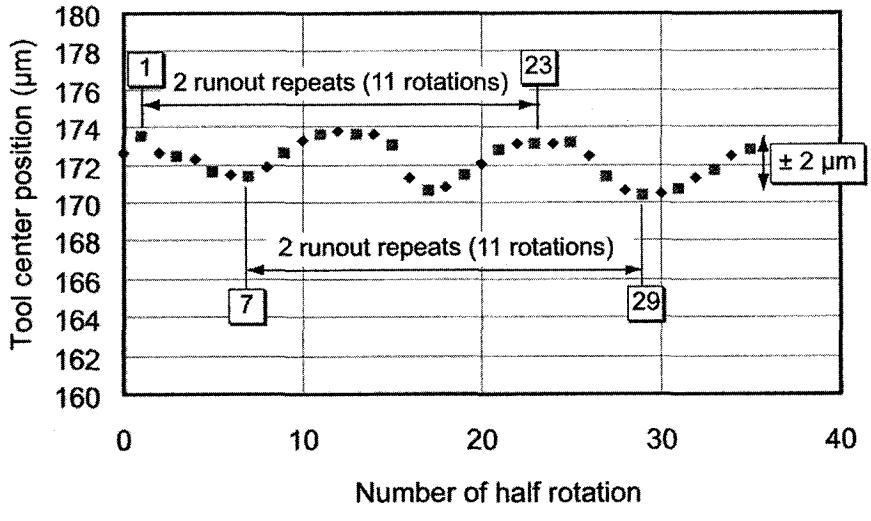


Fig. 7.13 Tool rotation runout analysis.

7.4 結言

本章で得られた成果をまとめると以下のようになる.

- 摩耗切れ刃（切削長さ 4.4 m）において大きく後退した刃先は回折パターンにおける刃先側の 1 次回折光の強度を低下させる.
- 摩耗切れ刃の影響で微小間隙の測定値の直線性は少し低下するが，刃先–基準ナイフエッジの間隙を 30 μm 前後に設定することで，測定誤差は無視できるほど小さくなる.
- 電動ステッピングモータを付け加えたことで，加工機上でチャックに付けたまま工具を連続的に回転することが再現でき，オンマシン計測の可能性を実験的に検討することができた.
- 工具が一周回転した場合の切れ刃位置の自動検出実験から，以下のことがわかった.
  - 測定結果からエッジ間隙が最も小さくなる谷部は，被測定工具のそれぞれの刃先に相当しており，本手法において自動切れ刃位置検出が可能であり，オンマシン計測の可能性が示唆された.
  - 切削前と切削後の工具切れ刃位置を計測することによって，工具の刃先後退摩耗量を測定できることを示した.
  - 計測した 2 枚刃の摩耗量の偏りから，極小径工具において切削時の工具の回転振れ状態が工具摩耗に大きく影響することがわかった.
- シートレーザビームの走査測定の切れ刃位置自動検出実験から，以下のことがわかった.
  - 測定結果から，谷部のみを連続的に検出してそれぞれの切れ刃位置マップを作成することによって，振れ状態を含めた 2 次元的な切れ刃プロファイルが得られる．さらに，測定結果の角度情報を用いること

で，角度センサーを使わずに三次元の切れ刃プロファイルの測定が可能になる．

- また，刃先に相当する谷部の間に生ずる浅い別の谷部は切れ刃溝の溝エッジを示している．工具の先端にある切り屑を排除する溝についても測定結果から計測できる．
- 工具回転変動の測定結果は，±2 μm の工具回転振れ量をオンマシンで計測可能であることを示した．したがって，本測定手法は工具の取り付け誤差である偏心量を計測することができ，現場での応用が期待できる．

以上，本計測手法はオンマシンで極小径工具の切れ刃位置計測に適用できることを検証した．

第8章　極小径工具の摩耗切れ刃プロファイル計測

What a piece of work is man.

William Shakespeare (1564 – 1616)

8.1　緒言

提案した回折ゲージ法は1 mm以下の極小径工具を対象とした切れ刃プロファイル計測手法である．本章では，まずオンマシンでの工具摩耗量計測の可能性を検討するため，第6章で摩耗実験に使用した切削長さの異なる5本の極小径工具（ϕ 0.3 mm）について，切れ刃位置の自動検出測定実験を行ない，その摩耗量と切削長さの関係を示す．次に，ねじれ角をもつ摩耗切れ刃三次元プロファイルの測定を行ない，その測定精度を検討するために，測定した切れ刃プロファイルをSEMで撮影した写真と比較し，極小径工具の三次元切れ刃プロファイルの測定精度を検証し，本手法の有効性を確認する．

8.2 摩耗工具の切れ刃後退摩耗量

8.2.1 摩耗工具の直径変化

第7章に切れ刃位置の自動検出法を述べた．この測定法で第6章で切削して摩耗させた5本の工具試料を用い，その工具の軸方向における各位置の工具径の測定を試みた．本測定では切削摩耗実験をする前にあらかじめ各工具の工具径を測定しておき，摩耗実験後の各工具を再測定し，切削前と切削後の工具径を比較したものである．図8.1–図8.5にそれらの測定結果を示す．

試作した回転系の工具回転振れ

本実験の測定結果には工具の回転振れが含まれるため，平滑化する必要がある．試作した本回転系は振れ量の小さいローラステージ（付録A.3.2を参照）を採用した．このローラステージは工具回転に対して芯が無いため，工具の回転に対する振れが小さく，わずか±2〜3 μmである．しかし，工具回転振れの状態は一般の工作機械における回転系の振れ状態と違い，ローラの1周回転では振れを繰り返すが，工具の1周回転に対しては同じ振れは繰り返さない．ローラ（直径：7/8 inch $\approx$ 22.22 mm）が1周すると，工具（シャンク径[†]：4 mm）は22.22/4 = 5.55周回転するので，結局工具は5.5周ごとに同じような振れを繰り返すことになる．その効果は測定値にも反映している．図8.1–図8.5および第7章の図7.13から，工具径の測定値は約11点（11回転）ごとに振れが2回繰り返す．またその振れの振幅，いわゆる振れ量はローラ回転系の仕様の2倍±4〜5 μmになっていることがわかる．これは工具径を求める過程で，式(7.1)と式(7.5)を参考して，

$$d(y) = G - [x_l(y) + x_r(y)] \tag{8.1}$$

$$= G - \{[\mathfrak{X}_l(y) - \epsilon(y)] + [\mathfrak{X}_r(y) - \epsilon(y)]\}$$

$$= G - [\mathfrak{X}_l(y) + \mathfrak{X}_r(y)] + 2\epsilon(y) \tag{8.2}$$

[†] 工具の保持部分の直径

振れ量ϵは2倍になるからである．

工具径の測定結果

以上より，工具回転の振れ周期より長い，8点の移動平均による平滑化を2回行なった．マークの付いていない曲線は軸方向における各位置の平均した工具径の測定結果を表す．図8.1-図8.5に示したように回転振れの項が消去され，工具径$d(y)$とみなされるうねり曲線が残る．その結果，切削が行なわれなかった領域では切削前と切削後の工具径が一致していることから，工具径を測定した値の有効性が検証された．

軸方向に対する工具径変化の測定結果から以下のことがわかった．

- 切削実験が行なわれた切れ刃領域では，工具径の減量（後退摩耗量）が計測された．
- 切削長さの増加にともなって，摩耗が進行している．
- その摩耗形状は，正常摩耗パターン[‡]または，超硬合金に多い摩耗パターン[§]と類似しており，工具材が超硬合金であることから，本手法の摩耗計測の有効性が示唆された．

[‡] 工具の先端に向かって摩耗量が均等する摩耗パターン [39]
[§] 工具の先端に向かって摩耗量が次第に小さくなるような摩耗パターン

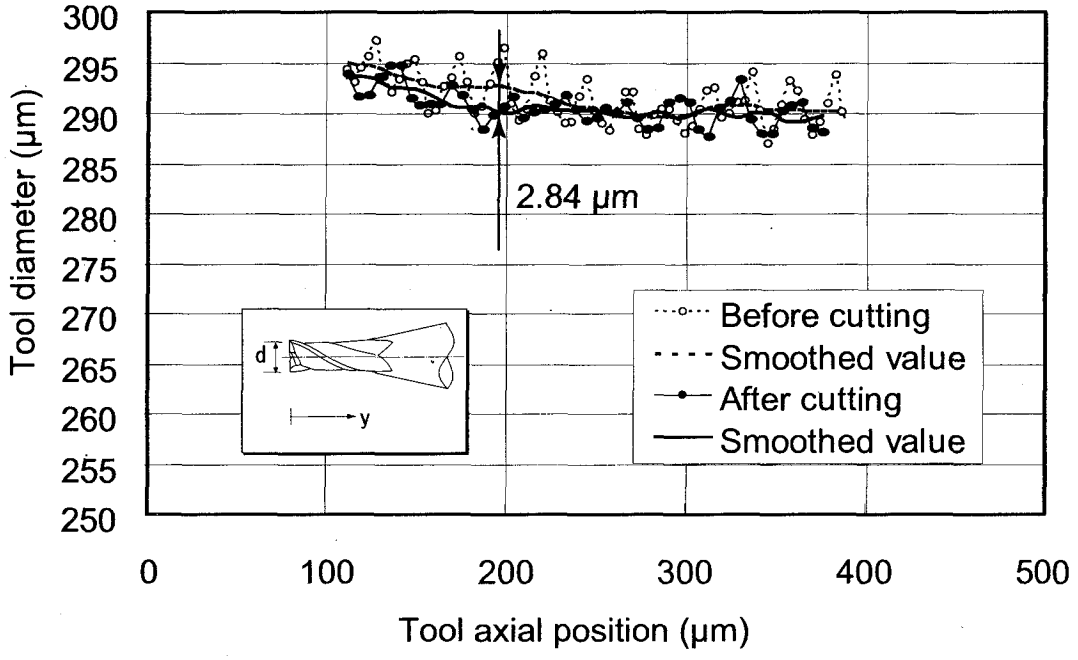


Fig. 8.1 Measured tool diameter on micro endmill with 0.55 m cutting length.

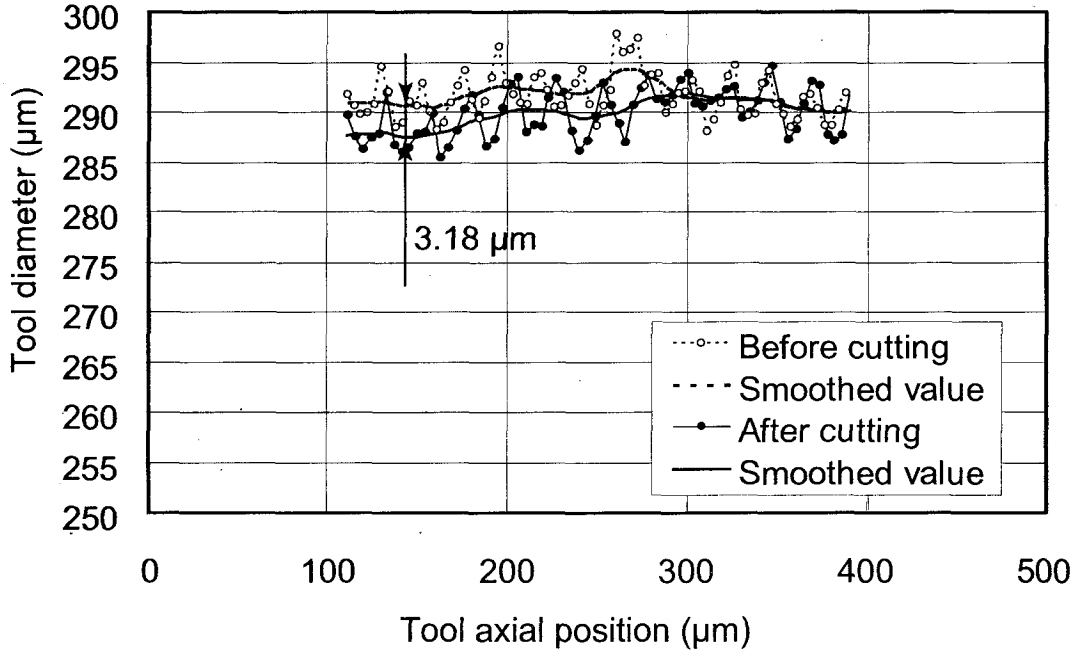


Fig. 8.2 1.10 m cutting length.

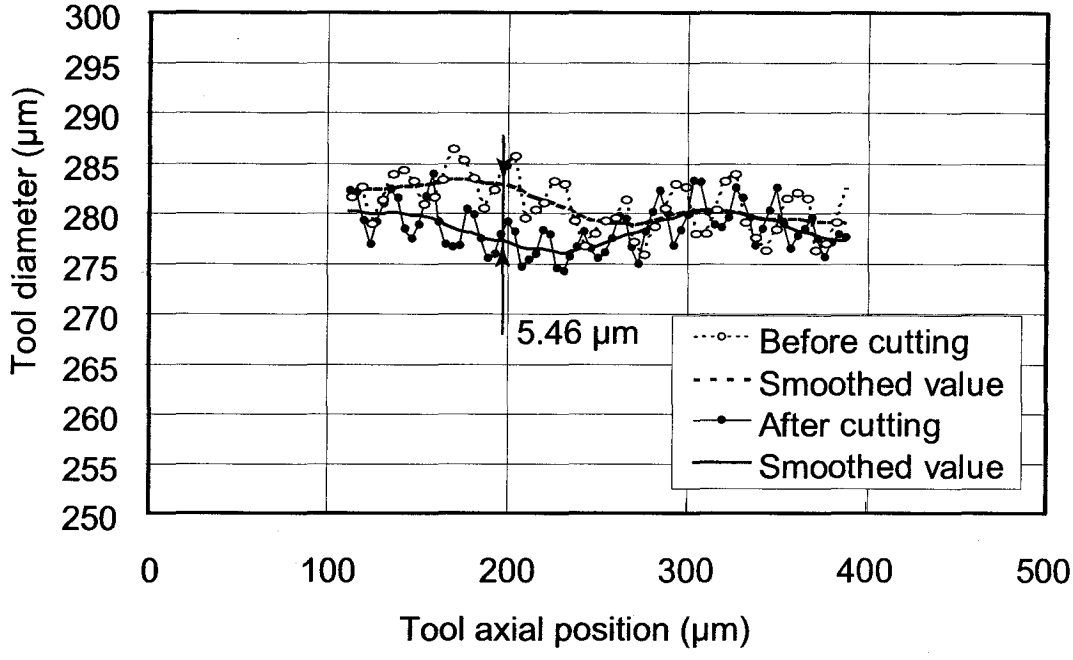


Fig. 8.3 2.20 m cutting length.

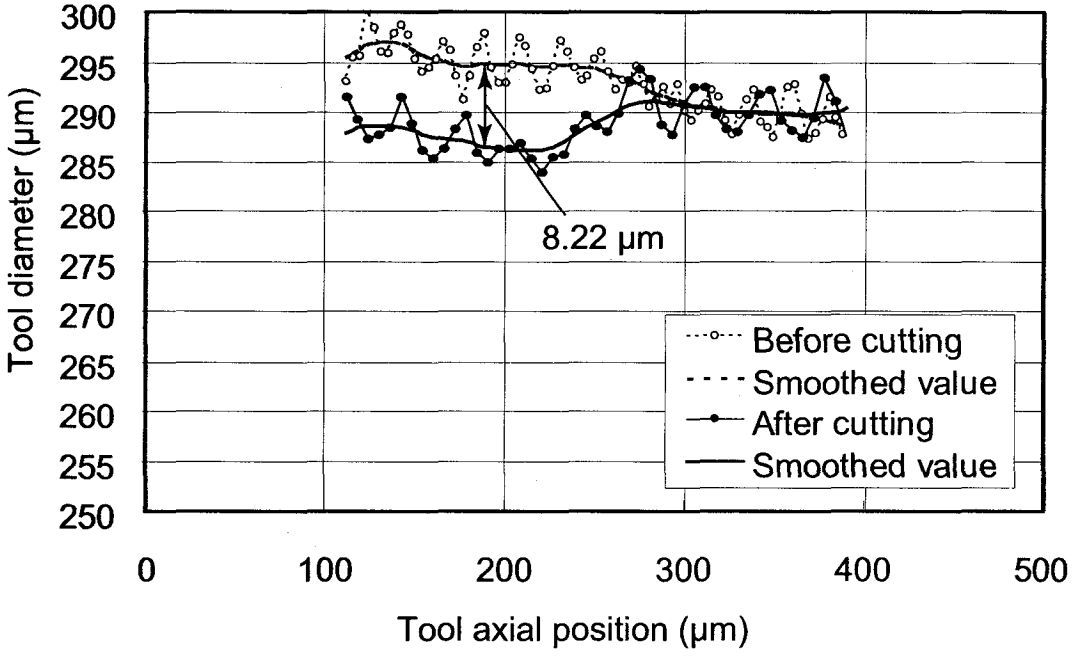


Fig. 8.4 3.30 m cutting length.

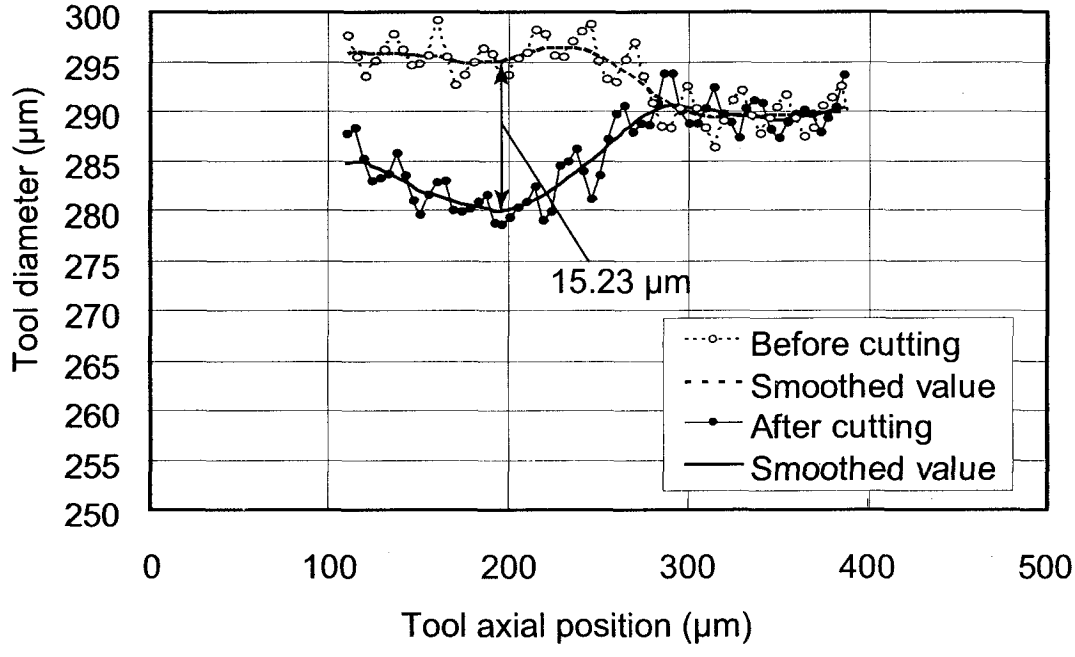


Fig. 8.5 4.40 m cutting length.

8.2.2 切れ刃後退摩耗量と切削長さの関係

図8.6には工具の切れ刃後退摩耗量に相当する工具径の減少と切削長さの関係を示す．JIS B 4011では“比較的摩耗が一様なとき（正常摩耗）はその平均値をとるのを原則とするが，不均一なときは最大摩耗幅をとることができる”と定めている．これにより，切削長さの異なった5本の最大工具径後退摩耗量を図8.1–図8.5によりからを計測し，図8.6にその関係を示す．切削長さが，1.1 mまでは　.初期摩耗領域，1.1～3.3 mの間は　.比例（定常）摩耗領域，3.3 mからは　.急速摩耗領域に入るとみられる[39]．このように摩耗成長の過程が本計測実験で確認された．

また，測定した結果は摩耗の成長過程が一般の逃げ面摩耗の成長と同じ傾向にある．それは切れ刃後退量は以下の式(8.3)で逃げ面摩耗に比例する[40]ためである．このことから，本測定手法は逃げ面摩耗を推定することが可能である．

$$V_B = \delta \times (\cot\alpha - \tan\beta) \tag{8.3}$$

ただし，V_Bは逃げ面摩耗幅，δは切れ刃後退量，αは逃げ角，βはすくい角である．

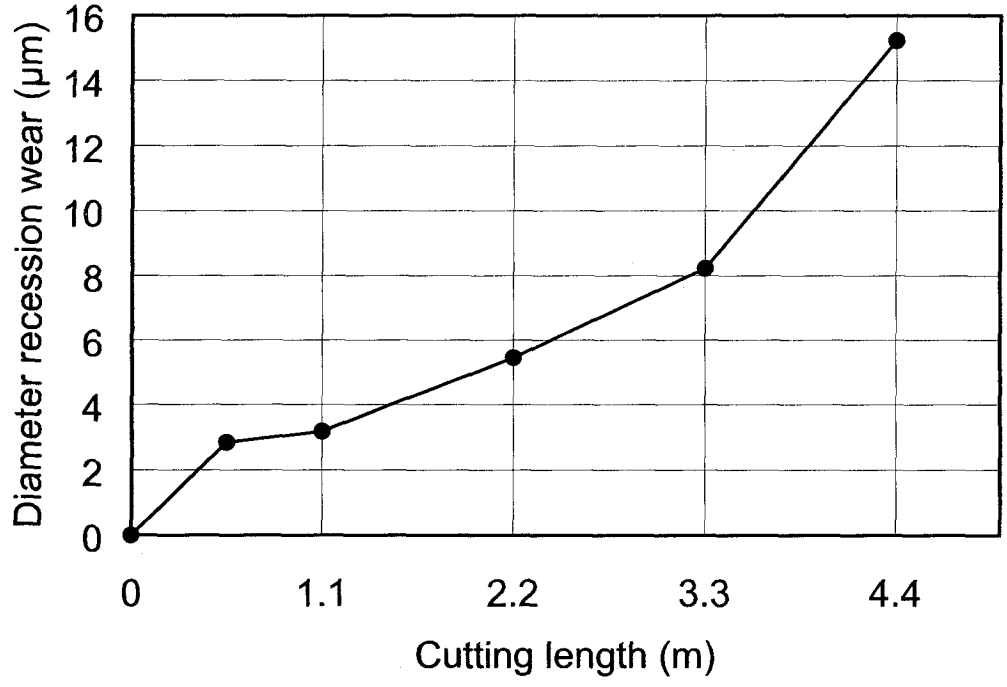


Fig. 8.6 Relationship between tool diameter recession and cutting length.

8.3 摩耗切れ刃プロファイル

8.3.1 測定手順

図8.7に極小径工具の切れ刃プロファイルの測定手順を述べる．5.2節と同じように，まず本光回折エッジ間隙測定法により，間隙ゲージGを設定する．次に挿入された被測定極小径工具（第6章の切削長さ4.40 mの工具）を左右それぞれのエッジ間隙x_l, x_rを測定し，測定値を確定する．そして，工具を下方に10 μm[¶]前後移動することで，シートレーザビームの走査を行なう．試料工具の極小径工具切れ刃はねじれ角をもつため，切れ刃先端を基準ナイフエッジに合わせるため，電動モータにより切れ刃が基準ナイフエッジとの間隙が最小となるように，工具を微小回転（2.2度前後）させてから，次の工具軸方向の位置において測定を行なう．このように，各位置の工具切れ刃の測定を繰り返し，極小径工具の切れ刃プロファイルの計測実験を行なった．

測定時の工具回転振れの検討

前節の採用している回転系で工具が5.5回転（1,980度）ごとに振幅± 2 μmの振れをする．しかし，この測定手順では一回の測定に対し工具が2.2度しか回らないため，工具は9 nmの振れ量しかなく，振れの項を無視できる程度の条件となり，切れ刃プロファイルの測定に有利である．

¶ 分解能1 μmのプローブ式座標検出器を用いて移動量を測定する．

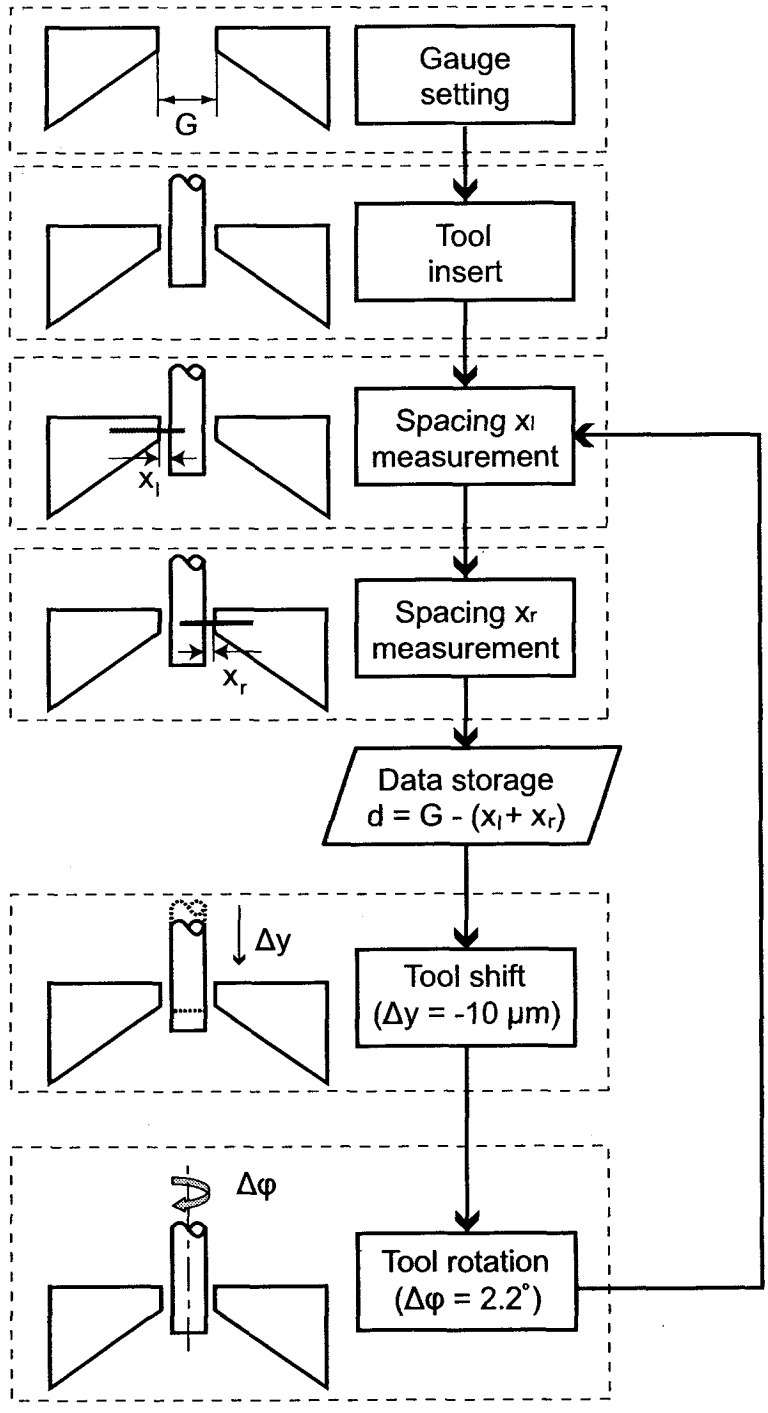


Fig. 8.7 Measurement procedure for micro endmill cutting-edge profiles.

8.3.2 測定結果

測定した切れ刃プロファイル

一例として切削長さ 4.40 m の工具について，工具の先端から 100–450 μm の領域にわたって測定を行なった結果を，図 8.8 に 2 次元的に表示する．切れ刃が摩耗している領域としていない領域がはっきりと区別できる．すでに 7.3 節に述べたように，この工具では主に片側の切れ刃摩耗が進行していることがわかる．切れ刃プロファイルには長いうねりのような変動が見られる．切削に関与しない切れ刃上部の平均工具径は 289.9 μm であり，切削により摩耗した下部の平均工具径は 279.9 μm である．この場合は最大摩耗ではなく平均した摩耗量は約 10 μm であることがわかる．そして，図 8.9 に回転角度 102 度にわたって測定した切れ刃プロファイルを三次元的に示した．さらに図 8.10 図 8.13 は三次元的なねじれ刃プロファイルの様子をわかりやすくするために 30 度ずつ回転させて表示したものである．

SEM 観察像との比較

次に，測定した切れ刃プロファイルの精度について考慮するために，走査型電子顕微鏡（SEM）により得られた切れ刃プロファイルの観察像と，測定した切れ刃プロファイルの比較を行なった．結果を図 8.14 に示す．さらに，摩耗の進行が著しい右側の切れ刃プロファイルを拡大し，SEM 観察像と比較した結果を図 8.15 に示す．これらの結果から分かるように，SEM 観察像と測定した切れ刃プロファイルは良く一致しており，測定したプロファイル切れ刃摩耗の特徴を正確に捉えていることから，本手法が摩耗切れ刃プロファイルの高精度測定に有効であることが実証された．

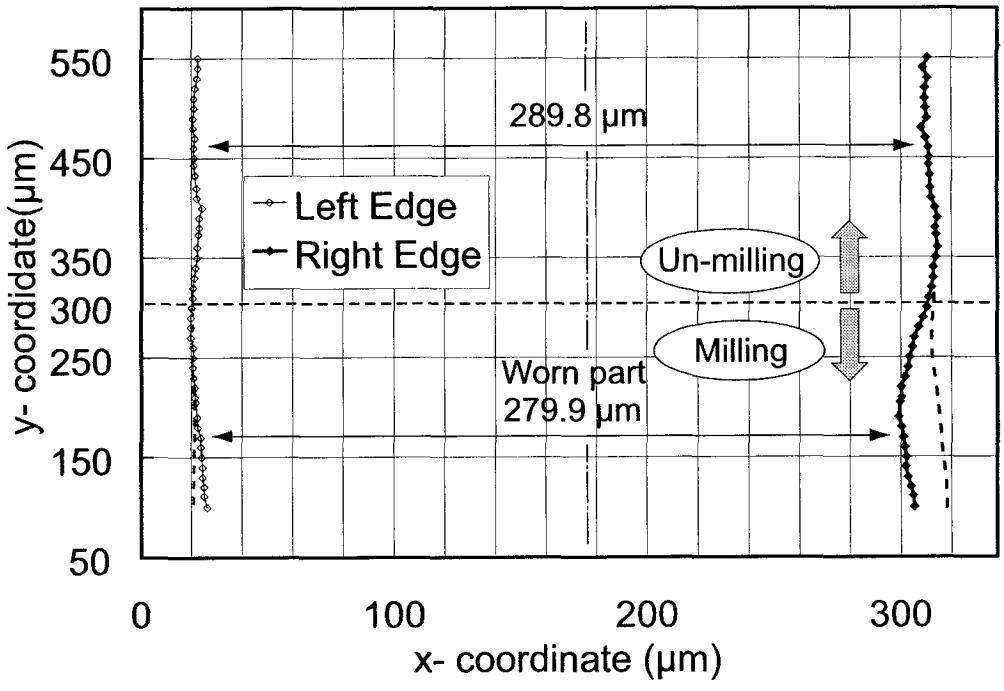


Fig. 8.8 Measured cutting-edge profiles in 2 dimensions.

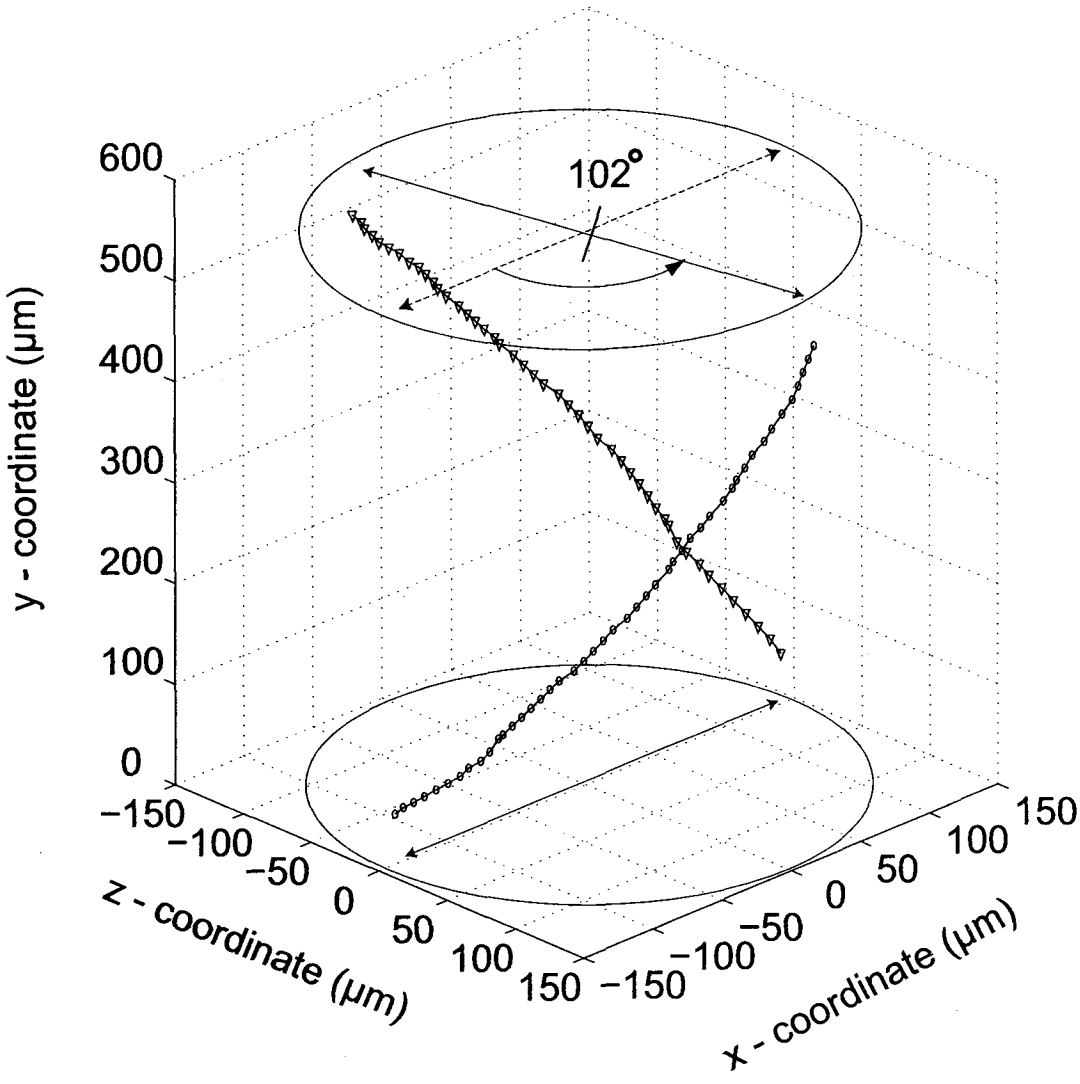


Fig. 8.9 Micro endmill cutting-edge measured profiles.

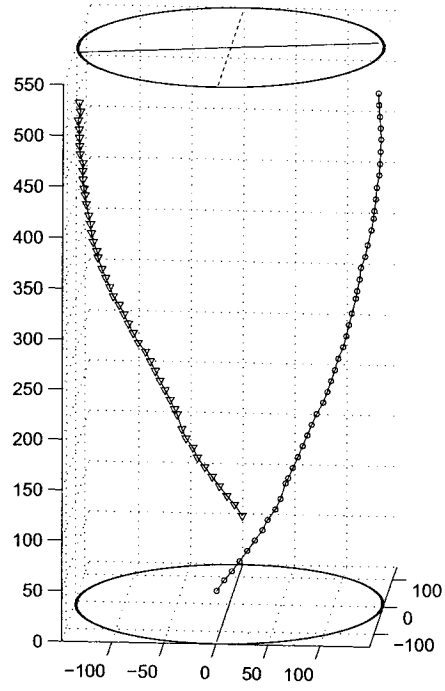


Fig. 8.10 Measured profiles at rotation of 0 deg.

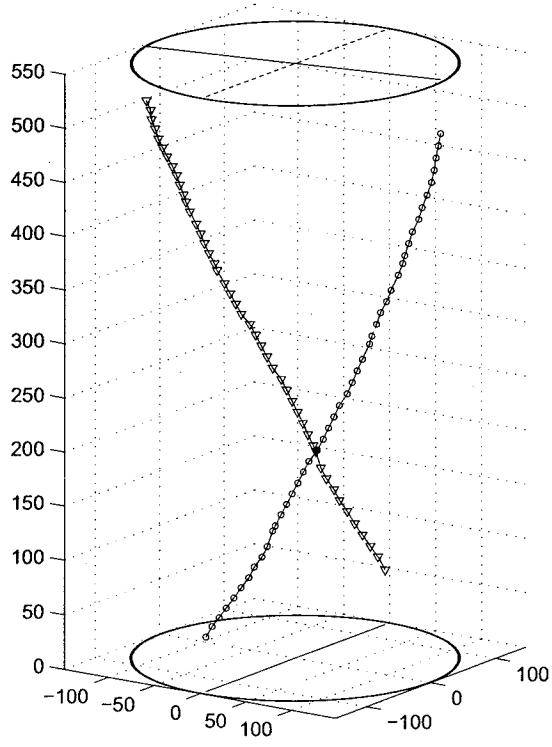


Fig. 8.11 30 deg.

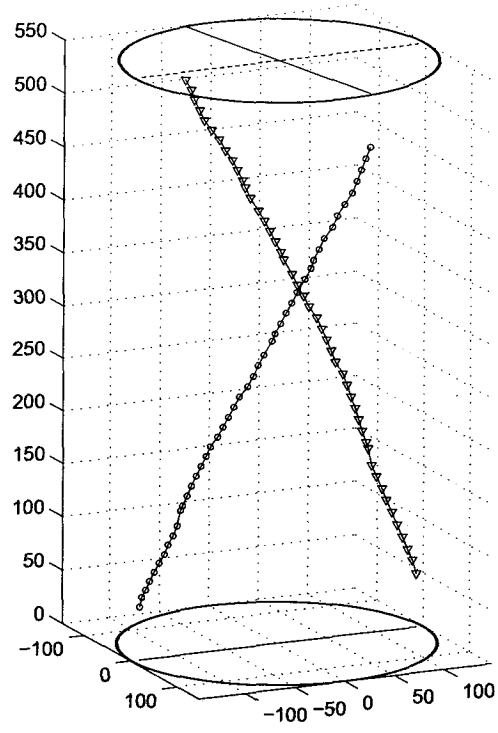


Fig. 8.12 60 deg.

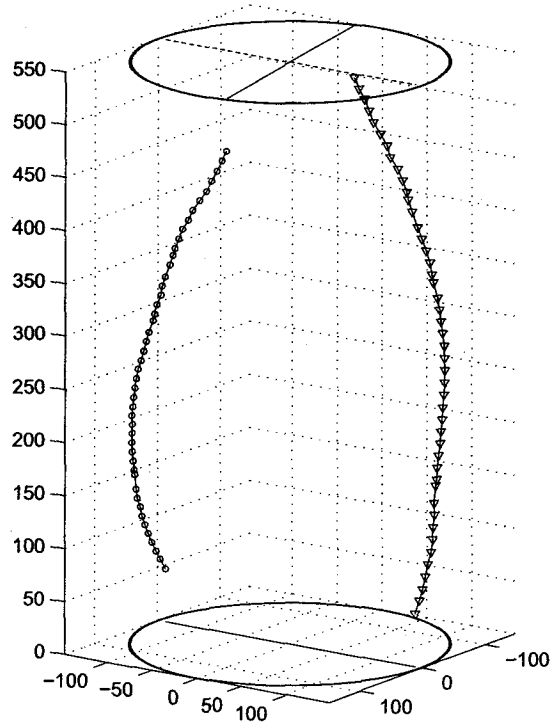


Fig. 8.13 120 deg.

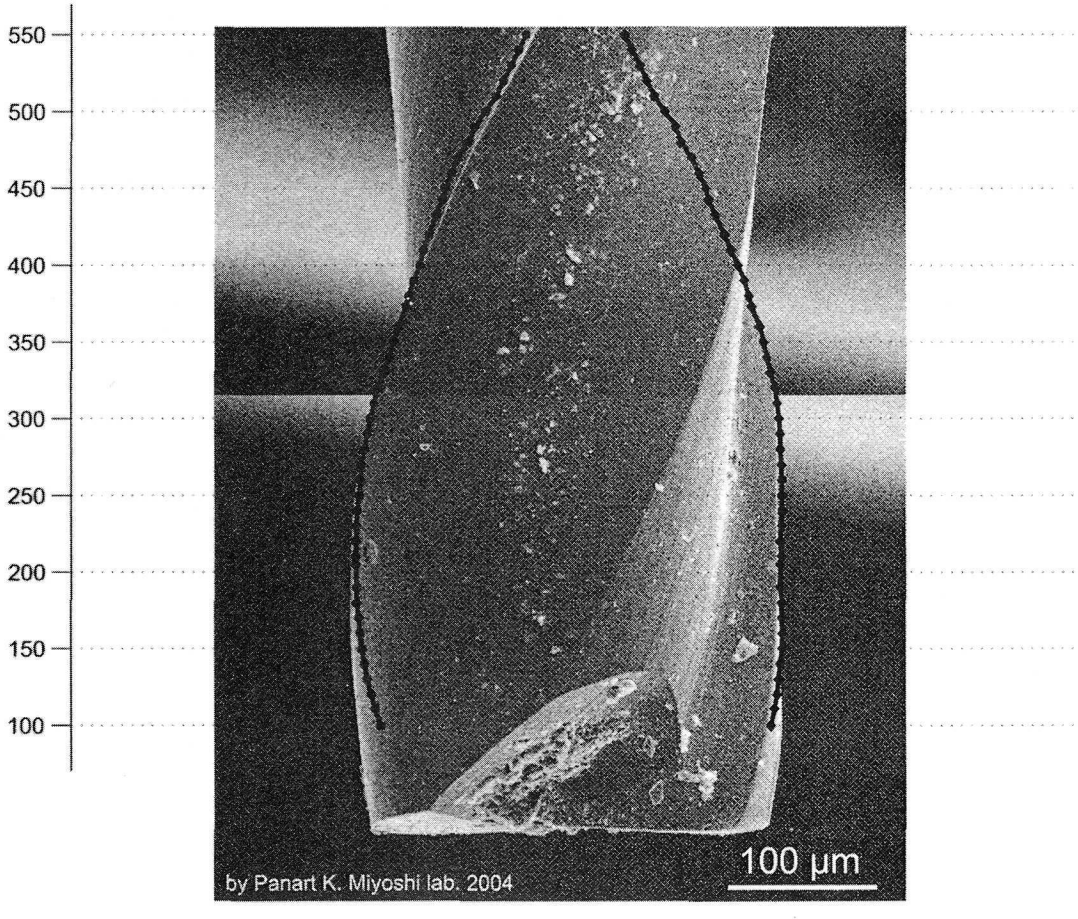


Fig. 8.14 Measured profiles comparison with SEM image.

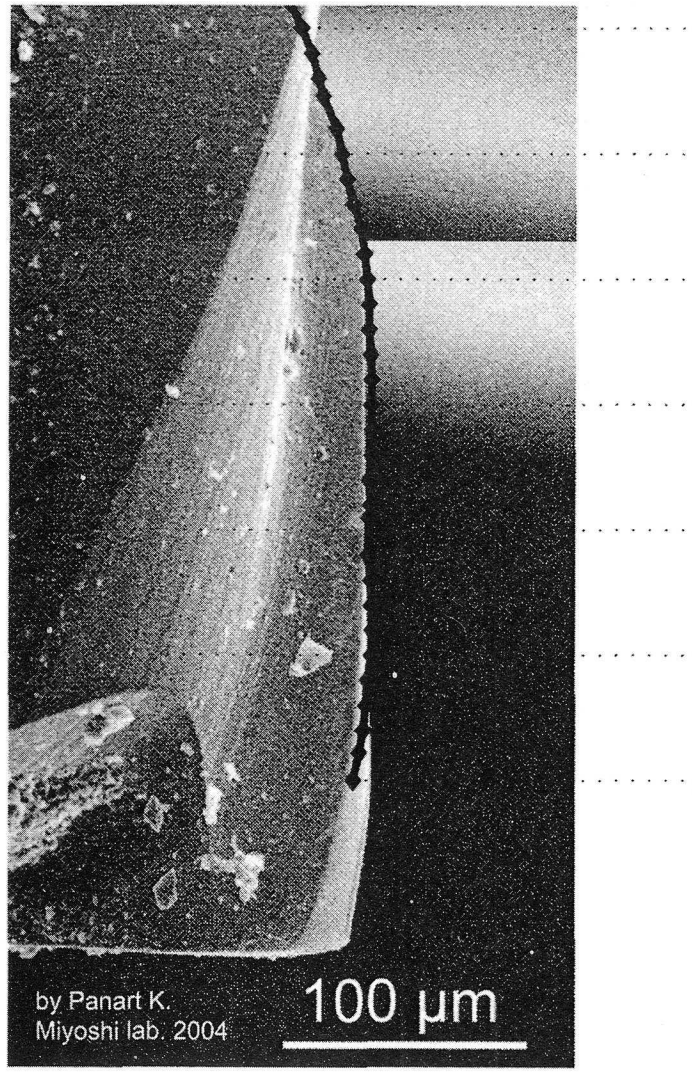


Fig. 8.15 Zoom in of measured results certify the validity of measurement.

8.4 結言

本章では，提案した光回折ゲージ法に基づいて試作した切れ刃三次元プロファイル計測システムを用いて，本手法の有効性を検討した．まずオンマシン環境と同様な切れ刃位置の自動検出による工具径後退摩耗量の測定・評価を行ない，オンマシン計測法の可能性を示した．次に，摩耗した極小径工具（ϕ0.3mm）の三次元切れ刃プロファイルの測定実験を行ない，測定結果をSEMで撮影した観察像と比較した結果，お互いの三次元切れ刃プロファイルは良く一致しており，提案した手法が摩耗三次元切れ刃プロファイルの高精度計測に有効であることを確認した．

第9章　結論

Roma was not built in one day.

本研究は，高精度で微細な精密切削加工におけるマイクロ工具の管理を行なうことができるような，オンマシン計測への適用を考慮した極小径工具切れ刃プロファイル計測法の開発を目的として，光回折パターンに基づく新しい測定原理の光回折ゲージを提案し，その有効性について理論・実験の両面から検討を行なった．以下に本研究で得られた結論を総括する．

第1章「緒論」では，研究の背景，従来の計測手法についてまとめ，本研究の目的および提案手法の概観を述べた．

(1) さらなる高精度微細切削加工を実現するために，オンマシンにおいてマイクロ工具切れ刃形状を把握する必要がある．

(2) これまでに様々なオンマシン計測手法が開発されてきたが，極小径工具を対象として，高精度に計測できる手法はまだ確立していない．

(3) 提案手法は，光回折パターンを利用することで，長作動距離かつ非接触・高速で高精度計測が期待でき，オンマシンの適用性をもつ．

第2章「理論解析」では，提案手法の基礎となるFraunhofer回折現象の数学的意味を述べ，それに基づいて理論展開を行ない，微小エッジ間隙を測定するためのFraunhofer回折光のパターンについて解析および検討を行なった．

(1) 回折パターンの主強度以外の最も観測し易い1次回折光間の距離を採用することで，エッジ間隙が50 μm以下に設定することにより，そのエッジ間

隙の測定分解能は数nm～数十nmとなり，計測手法の高精度の可能性を示唆した．

(2) 工具切れ刃と基準ナイフエッジの微小間隙を形成する際にエッジのずれが数μm生じても，測定精度にたかだか3.5 nmの誤差しか与えないことから，本測定法の高い実用性を示した．

第3章「光回折ゲージ法」では，エッジ間隙の測定法を利用して極小径工具の切れ刃プロファイルをサブμmの精度で計測できる光回折ゲージ法を提案し，それに基づいた測定装置の試作について述べた．

(1) 試作した測定装置のサイズは300 mm四方以内で，コンパクトでオンマシンに投入することができる．

(2) 使用するシートレーザビームは，エッジ間隙に照射される範囲では厚み20 μmで，平面波の一様強度分布である．

第4章「エッジ間隙の測定基礎実験」では，エッジ間隙測定法の理論解析結果を検証するため，基礎実験としてエッジ間隙からの回折パターンを観測し，1次回折光間隔の求め方を述べた．次に，疑似工具および小径工具（ϕ 1.8 mm）に対して切れ刃–基準エッジ間隙を変化させたときの1次回折光間隔との関係を求めた．得られた結果は以下のとおりである．

(1) エッジ間隙が小さくなるとともに，回折パターンはより広がる．

(2) 回折パターンの主強度をカットすることによって，1次回折光間隔が高S/N比で測定できるようになる．

(3) 切れ刃先端の位置測定の分解能について検討した結果から，直ぐ刃およびねじれ刃いずれの場合も理論曲線と良く一致しており，エッジ間隙を30 μm前後に設定することで，繰返し精度（標準偏差）30 nm，分解能20 nmで，工具切れ刃位置を測定できる．

(4) さらに，エッジ間隙を10 μm前後にすることで，測定は非常に高感度となり，3.5 nm/pixelの測定分解能が得られた．

第5章「小径工具の切れ刃プロファイル計測」では，試作した計測システムを用いて小径工具における連続した切れ刃プロファイルの測定を試み，次に走査型イオン顕微鏡（SIM）の観察像との比較を行ない，本手法の測定精度を検討した．得られた結果から以下のことがわかった．

(1) 小径直ぐ刃エンドミル（ϕ 2.0 mm）の測定した切れ刃プロファイルとSIM観察像との比較により，本手法は切れ刃の微小凹凸を高精度に計測できることが示唆された．

(2) 小径ねじれ刃エンドミル（ϕ 1.8 mm）の測定結果から，ねじれ刃の場合でも工具径および三次元切れ刃プロファイルが計測できることを示した．

第6章「極小径工具の摩耗実験」では，摩耗した極小径工具（ϕ 0.3 mm）の計測試料を準備するため，摩耗の進行が早いと思われるグラファイトの切削実験を行ない，これらの工具を顕微鏡観察した．また，その極小径工具刃先とのエッジ間隙を500 nmステップ変化の応答測定を試みて以下のことがわかった．

(1) 切削時の回転振れ（$\pm$ 5 μm）の影響により，切削長さの異なる5本の摩耗工具に，偏った切れ刃摩耗が顕微鏡で観察された．

(2) ねじれ刃の曲率が大きい極小径工具の場合でも，繰返し精度（2SD）86 nm，分解能0.1 μm以下で切れ刃摩耗の検出が可能である．

第7章「極小径工具の摩耗切れ刃位置検出」では，第6章で切削して摩耗した極小径工具（ϕ 0.3 mm）を用いて，摩耗切れ刃が測定精度に及ぼす影響を検討した．次に，加工機上と同じような状況を再現するために計測システムを改良し，オンマシン計測と同様に切れ刃位置の自動検出を試みた．得られた結果をまとめると次のとおりである．

(1) 刃先-基準ナイフエッジ間隙を30 μm前後に設定することで，摩耗切れ刃の影響なく切れ刃位置を高精度に測定することができる．

(2) 工具をチャックに付けたままの状態を加工機上と同じように再現することから，オンマシン計測への可能性を検討することができる．

(3) 工具を一周連続回転させてエッジ間隙を測定することは，測定値の最小値が工具刃先を意味し，本手法において自動切れ刃位置検出が可能であり，オンマシン計測の可能性が示唆された．

(4) 切削前と切削後の工具切れ刃位置を計測することによって，工具の刃先後退摩耗量を測定できることを示した．

(5) シートレーザビームの走査測定実験を行なった結果，自動検出された各刃先位置から回転振れを含めた二次元的な切れ刃プロファイルが得られる．また，測定結果に含んでいる角度情報を使用すれば，角度センサーを使わずに三次元の切れ刃プロファイルの測定が可能になる．

(6) 次に，今回測定を行なった回転系で，$\pm$2 μmの工具回転振れ量が計測され，回転ステージの仕様と一致している．したがって，本測定手法は工具の取り付け誤差である偏心量を計測でき，現場での応用が期待できる．

以上，本計測手法はオンマシンで極小径工具の切れは位置計測に適用できることを検証した．

第8章「極小径工具の摩耗切れ刃プロファイル計測」では，第6章で切削加工によって摩耗した極小径工具（ϕ 0.3 mm）を用い，第7章で述べたオンマシンにおける走査測定法により切削長さと刃先後退摩耗量との関係を求めた．次に，摩耗切れ刃三次元プロファイル測定実験を行ない，極小径工具に対する本手法の測定精度を検討した．得られた結果をまとめると以下のとおりである．

(1) 測定した工具の摩耗形状は，正常摩耗パターンまたは超硬合金である工具材に多い摩耗パターンと類似した．

(2) 測定した工具径の後退摩耗量から，切削長さと摩耗量の関係および摩耗成長の過程が確認された．

(3) 回転振れを含まない切れ刃プロファイル測定実験結果から，切削条件と同じように切削に関与する（摩耗した領域）としない（摩耗しない領域）領域が明確に識別された．

(4) 測定した三次元切れ刃プロファイルは，高分解能・高信頼性をもつSEMの観察像と良く一致していることから，摩耗極小径工具の切れ刃プロファイルが本手法により高精度に測定された．

以上，提案した光回折ゲージ法は，オンマシンにおいて極小径工具切れ刃プロファイルを高精度に測定できることから，本手法の有効性が示された．

付 録A　仕様

装置に組み込まれた主要な部品の仕様を記す.

A.1 System part specifications

A.1.1 Laser source

Table A.1 Specification of LD element.

LD 素子：東芝製 TOLD9443MC

駆動極性		+単一電源タイプ
パッケージ	mm	ϕ5.6
波長	nm	650
出力	mW	10

Table A.2 Specification of LD drive device.

LD 駆動装置：酒井硝子エンジニアリング製 LD-222J

制御形式		定光出力 (APC)，定電流 (ACC)
変調		連続 (CW)
駆動電圧 Vop	V	20 (Max)
駆動電流 Iop	mA	150 (Max)
モニタ電流 Im	mA	5.0 (Max)
リミッタ電流設定 Iop	mA	80, 100, 120, 150，VR(任意設定)
モニタ電流設定	mA	0.5, 1, 2, 5，VR(任意設定)
アナログ出力		Iop: 100 mA = 1 V 変換，Im: 1 mA = 1V 変換

Table A.3 Specification of laser diode floodlight. (Construction of sheet laser beam.)

半導体レーザ投光器：酒井硝子エンジニアリング製 LD-12ES

ビーム照射		スリットパターン
光学系	レンズ構成	1群1枚 (シリンドリカル)
寸法		ϕ15 mm ×51 mm
重さ	g	57
標準投射距離	mm	40
パターン長	mm	25
パターン厚	mm	.019

A.1.2 Transmission stages

Table A.4 Specification of stepping motor controller.

Stepping Motor Controller：SURUGA SEIKI 製 D92

出力パルス数		0 ～ 250000
スピード設定	Pulse/sec	1 ～ 16000
加減速レート	μsec/PPS	0 ～ 999
原点設定		機械原点検出機能 4 方式
リミット設定		N.C.(ノーマルクローズ)
インターフェース		IEEE-488, Std1975 (GP-IB), RS232C

Table A.5 Specification of super tremor x axis stage.

超微動 x 軸ステージ：SURUGA SEIKI 製 R10-60R

移動量	mm	粗動 ±6.5　微動 ±1.5
移動ガイド		V 溝レールとクロスローラー
移動精度	μm	真直度 2 ピッチング 20″, ヨーイング 10″
分解能	μm/パルス	微動 ≈ 0.05 (ハーフステップ)
繰り返し位置決め精度	μm	0.2 (微動部)
ロストモション	μm	1 (微動部)

A.1.3 Linear CCD

Table A.6 Specification of CCD line sensor.

Line Scan Camera : DALSA Piranha CL-P4

Resolution	pixel	6144
Pixel size	μm^2	7×7
Aperture		37.31 mm $\times$ 7 μm
Data rate		2×25 MHz
Max. Line/Frame rate	kHz	7.9
Data format		$2 \times$ 8–bit LVDS
Responsivity†	$DN/(nJ/cm^2)$	20.6
Dynamic Range		207:1
Operaing temperature	°C	0 – 50
Power supply	V	12 – 15

† DN is Digital Numbers, also known as "levels" (0-255 for 8 bit systems).

A.2 Rotation stage

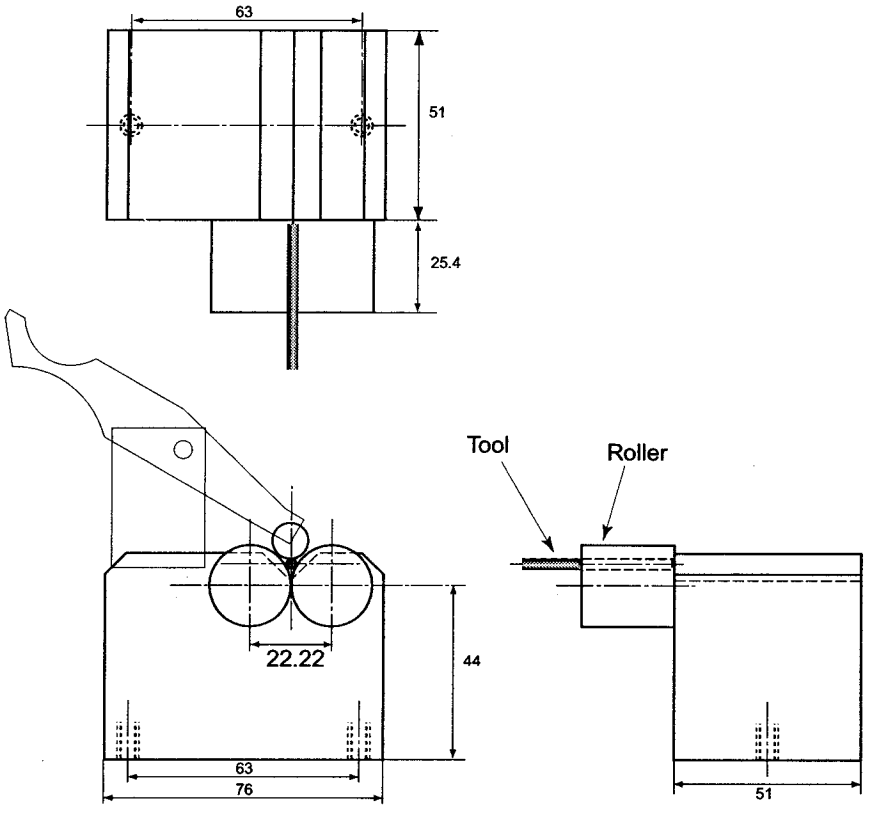


Fig. A.1 Roller stage dimensions.

Table A.7 Specification of roller stage.

Roller stage : Universal punch JLP–10

Work diameter (Tool shank dia.)	mm	up to 25
Rotation runout	mm	2/1000
Full zero roller		110-10FZ
Roller diameter	mm	22.22
Roller length	mm	25.40
Top Roller		Zero style roller (260–10)

A.2.1 Motor unit

Table A.8 Specification of stepping motor.

Stepping Motor : Oriental motor α STEP ASC Series

Motor & Driver package		ASC34AK-50
Motor type		Harmonic geared
Frame size	mm	28
Maximum holding torque	N·m	1.5
Resolution[‡]	deg/pluse	0.00072
Gear ratio		50
Permissible torque	N·m	1.5
Max torque	N·m	2.0
Permissible speed range	rpm	0 – 70
Static angle error[§]	deg	0.083
Shaft runout (T.I.R.[¶])	mm	0.05
Concentricity (T.I.R.)	mm	0.075
Perpendicularity (T.I.R.)	mm	0.075
Power supply	V	DC 24 ±10%
	A	1.0
Ambient Temperature	℃	0 – 40 (nonfreezing)
Ambient Humidity	%	< 85
Driver's input pluse frequency	kHz	250 (Max)
Driver's control command		Pluse train input

‡ 分解能切り替えスイッチが 10000 pluse/revolution に設定時

§ 負荷トルク範囲：±0.06 N·m

¶ T.I.R. (Total Indicator Reading)： 基準軸心を中心にし，測定部を 1 回転させた場合のダイヤルゲージの読みの全量

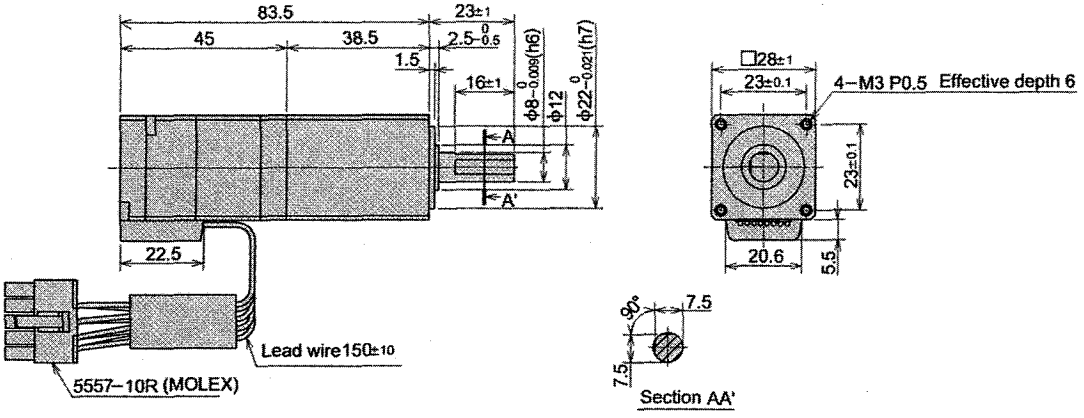


Fig. A.2 Motor dimensions.

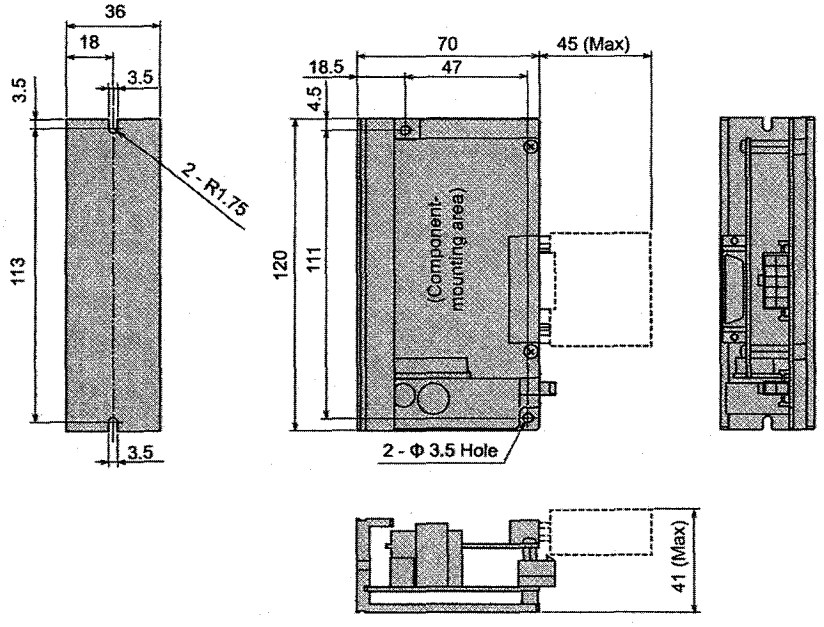


Fig. A.3 Driver dimensions.

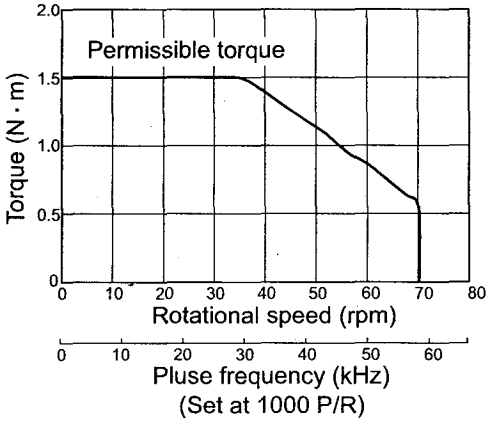


Fig. A.4 Torque at various rotational speed.

A.3 Microscope

A.3.1 SEM: Scanning Electron Microscope

Table A.9 SEM's main specification.

SEM：JEOL JSM-5800A

二次電子像分解能	nm	3.5
加速電圧	kV	0.3 – 30
倍率		×18 – ×300,000
試料寸法（最大）	mm	203.2 径装着可能
試料移動	mm	X 軸：125，Y 軸：100，Z 軸：5 – 48
	deg	傾斜：-10 – 90，回転：360 （エンドレス）

A.3.2 SIM: Scanning Ion Microscope

Table A.10 SIM's main specification.

SIM：Seiko Instruments SMI9200

イオン源		Ga 液体金属
加速電圧	kV	15 – 30 (常用：30)
倍率（on 17"display）		×75 – ×300,000
走査範囲（最大）	mm^2	2.4 × 2.4
像分解能	nm	7
試料寸法（最大）	mm^2	50 × 50，8 mm thick
試料移動	mm	X 軸：0 – 50，Y 軸：0 – 55，Z 軸：0 – 10
	deg	傾斜：0 – 60，回転：0 – 360

参考文献

[1] 河西敏雄ほか：『超精密生産技術大系 第1巻基本技術』フジテクノシステム（1995）pp.123.

[2] 河野嗣男，古田嘉太郎：『インプロセス計測・制御・加工』機械加工の高度化を目指して，日刊工業新聞社（1997）.

[3] 竹内芳美：「特集 マイクロ加工の最前線 －マイクロ切削加工－」『精密工学会誌』Vol.68，No.2（2002）pp.167.

[4] 沢田潔，竹内芳美：『超精密マシニングセンタとマイクロ加工』日刊工業春分者（1998）.

[5] 武藤一夫，高松英次：『金型設計・加工技術』日刊工業新聞社（1995）.

[6] http://www.efunda.com/processes/machining/mill.cfm より.

[7] 伊東誼・森脇俊道：『工作機械工学』コロナ社（1999）pp.149–150.

[8] 日本機械学会編：『機械加工計測技術』朝倉書店（1986）.

[9] 竹内芳美，志村孔史，沢田潔，佐田登志夫：「回転する主軸の軸方向変位の非接触計測の試み」『精密工学会誌』Vol.62，No.10（1996）pp.1430–1433.

[10] 大森整ほか：『 超精密・マイクロ機械加工とその展望』マイクロ加工研究会ホームページ，http://www.micro.ne.jp/theme/machinery/grinding.html より.

[11] 枡田正美：「特集 マイクロ加工の最前線 －マイクロ加工の現状と展望－」『精密工学会誌』Vol.68，No.2（2002）pp.165.

[12] 香山仁ほか：「ボールエンドミルの磨耗推定と高精度曲面加工への応用」『精密工学会誌』Vol.67，No.9（2001）pp.1427.

[13] 岩部洋育：「エンドミルによる加工精度に関する基本的問題と高速・高精度加工法について」『日本機械学会論文集』Vol. 66，No. 645，C 偏（2000）pp.1417.

[14] 河田聡ほか：『超解像の光学』日本分光学会測定法シリーズ（38），学会出版センター（1999）．

[15] WALTER AG 社：『Helicheck』カタログ，および http://www.walter-ag.com/intro.html のホームページ．

[16] 松村隆，村山李博，臼井英治：「エンドミル加工における工具逃げ面摩耗監視システム」『精密工学会誌』Vol.65，No.11（1999）pp.1617–1622.

[17] Oleg Ryabov, Kazuo Mori and Nagayoshi Kasashima : Laser displacement meter application for milling diagnostics, *Optics and Lasers in Engineering* Vol 30, No.3–4, (1998) pp.251–263.

[18] 笠島永吉，Oleg RYABOV，森和男：「レーザセンサを用いたインプロセス工具モニタリング法」『日本機械学会論文集』Vol.63，No.608，C偏（1997）pp.1237–1242.

[19] Hwa-Soo LEE, Tsutomu NAGASHIMA, Hiroyuki HAGA and Tadashi WAKABAYASHI : Optical Measurement for Flank Wear in Peripheral Cutting Edges in Endmills, *Proceedings of the 14th annual meeting（ASPE）* (1999) pp.360–363.

[20] 李和樹，長島勉，羽賀洋行，若林忠：「光学式エンドミル外周刃逃げ面摩耗測定装置の試作」『日本機械学会論文集』Vol. 66，No. 845，C編（2000）pp.1681–1686.

[21] 杉田忠彰，上田完次，稲村豊四郎：「マイクロ切削とその問題点」『基礎切削加工学』共立出版（1986）．

[22] Max Born and Emil Wolf：*PRINCIPLES OF OPTICS, Electromagnetic theory of propagation, interference and diffraction of light*, 7th(expanded) ed., (Cambrigde University Press, 1999).

[23] マックス・ボルン，エミル・ウォルフ；草川徹，横田英嗣 訳：「干渉および回折」『光学の原理 2』東海大学出版会（1975）．

[24] 左貝潤一：『光学の基礎』コロナ社（1998）．

[25] Eugene Hecht：*OPTICS*, 3rd ed., (Addison Wesley Publishing, New York, 1998).

[26] 及川正行：『偏微分方程式』理工系の基礎数学 4，岩波書店（1997）．

[27] 小瀬輝次ほか：『光工学ハンドブック』朝倉書店（1996）．

[28] 飯塚啓吾：「回折基礎理論」『光工学』共立出版株式会社（1978）.

[29] 松居吉哉：『結像光学入門』光学系取扱いの基礎，啓学出版（1988）.

[30] Dennis C. Henry : Numerical methods for solving two transcendental equations which appear in Fraunhofer diffraction, *American journal of physics*, Vol.44, No.3, (1976) pp.298–300.

[31] T. W. Mayes and B. F. Melton : Fraunhofer diffraction of visible light by a narrow slit, *American journal of physics*, Vol.62, No.5, (1994), pp.379–403.

[32] 工藤恵栄，上原富美哉:『基礎光学』光線光学・電磁光学，現代工学者（1990）.

[33] E. Bernabeu, I. Serroukh and L. M. Sanchez-Brea : Geometrical model for wire optical diffraction selected by experimental statistical analysis, *Optical engineering*, Vol.38, No.8, (1999), pp.1319–1325.

[34] 南茂夫：『科学計測のための波形データ処理』計測システムにおけるマイコン/パソコン活用技術，CQ 出版社（1986）.

[35] 神野郁夫ほか：『計測工学』昭晃堂（2002）.

[36] 鳥居孝夫：『計測と信号処理』コロナ社（1997）.

[37] 三好隆志，高谷裕浩，ほか 2 名：「三次元自由局面の非接触形状測定センサの開発研究（第 3 報）」『精密工学会誌』Vol.61，No.2（1995）pp.258–262.

[38] J. Fukaya, A. Sasaki, Y. Matsuda and H. Aoyama : Fraunhofer Diffraction Pattern by a Slit Aperture between a Knife Edge and a Metal Cylinder, *OPTICAL REVIEW* Vol.2, No.2 (1995) pp.139–143.

[39] 藤村善雄：『実用切削加工法』共立出版（1981）pp.70–71.

[40] 仁平宣弘，朝比奈奎一：『課介在量と加工技術』技術評論社（2003）pp.214–215.

関連発表論文

学術論文

[1] カチョーンルンルアン パナート，三好隆志，高谷裕浩，高橋哲，原田李，砂金総一郎：小径工具切れ刃プロファイルの光回折オンマシン計測に関する研究（第1報，光回折ゲージ法の提案とその検証実験）．日本機械学会論文集，70巻700号C編，pp.3556–3563，2004.

[2] カチョーンルンルアン パナート，三好隆志，高谷裕浩，原田李，砂金総一郎：小径工具切れ刃プロファイルの光回折オンマシン計測に関する研究（第2報，極小径工具（ϕ 0.3 mm）摩耗の測定評価）．日本機械学会論文集，投稿中．

[3] 高谷裕浩，K. パナート，三好隆志，高橋哲，原田李，砂金総一郎：レーザ回折法による小径工具切れ刃先端の3次元プロファイル計測．型技術，17巻8号，pp.106–107；2002.

[4] 高谷裕浩，K. パナート，三好隆志，河兌坪，原田李，砂金総一郎：光回折ゲージ法による小径工具切れ刃プロファイル計測に関する研究．型技術，19巻8号，pp.120–121，2004.

国際会議発表論文

[1] Panart Khajornrungruang, Takashi Miyoshi, Yasuhiro Takaya, Satoru Takahashi, Takashi Harada and Soichiro Isago. Novel edge profile measurement of micro cutting tool by laser diffraction. Proceedings of the 4th European Society for Precision Engineering and Nanotechnology (**euspen**) International Topical Conference, Aachen, Germany, pp.463-466, 2003.

[2] Panart Khajornrungruang, Takashi Miyoshi, Yasuhiro Takaya, Takashi Harada and Soichiro Isago. Laser diffraction edge profile method of micro cutting tool for on-machine measurement. Proceedings of the 2nd International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century (LEM21), Niigata, Japan, pp.113-118, 2003.

国内口頭発表

[1] カチョーンルンルアン パナート，三好隆志，高谷裕浩，河兌坪，原田李，砂金総一郎：小径工具切れ刃プロファイルの光回折オンマシン計測法に関する研究（第2報）-工具回転振れの誤差解析-．2004年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集，G37，pp.647-648，東京，2004.

[2] K. Panart，三好隆志，高谷裕浩，高橋哲，原田李，砂金総一郎：小径工具切れ刃プロファイルの光回折オンマシン計測法に関する研究（第1報）-三次元切れ刃プロファイル測定装置の試作-．2003年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集，I07，p.361，東京，2003.

[3] K. Panart，三好隆志，高谷裕浩，高橋哲，原田李，砂金総一郎：光回折による小径工具切れ刃断面プロファイル計測法に関する研究（第1報）-ねじれ刃の精度に及ぼす影響-．2002年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集，P15，p.724，東京，2002.

[4] カチョーンルンルアン パナート，三好隆志，高谷裕浩，原田李，砂金総一郎：極小径工具切れ刃プロファイルの光回折オンマシン計測に関する研究（摩耗切れ刃の検証実験）．日本機械学会 第5回生産加工・工作機械部門講演会論文集，pp.125-126，大阪，2004.

[5] カチョーンルンルアン P.，三好隆志，高谷裕浩，高橋哲，原田李，砂金総一郎：小径工具切れ刃プロファイルの光回折オンマシン計測に関する研究（光回折ゲージ法の提案）．日本機械学会 第4回生産加工・工作機械部門講演会論文集，pp.151-152，愛知，2002.

[6] K. パナート，三好隆志，高谷裕浩，高橋哲，原田李，砂金総一郎：光回折による小径工具切れ刃の断面プロファイル計測法に関する研究（理論解析と基礎実験）．日本機械学会 第3回生産加工・工作機械部門講演会論文集，pp.105-106，神奈川，2001.

[7] カチョーンルンルアン パナート，三好隆志，高谷裕浩，原田李，砂金総一郎：極小径工具切れ刃プロファイルの光回折オンマシン計測法の開発．2004年度砥粒加工学会学術講演会講演論文集，C09，pp.221-222，滋賀，2004.

その他

型技術 17 巻 8 号に掲載された研究論文

高谷裕浩，K. パナート，三好隆志，高橋哲，原田李，砂金総一郎：
『レーザ回折法による小径工具切れ刃先端の 3 次元プロファイル計測』

により，型技術者会議に発表された一般論文より総合的に優秀な論文として，第 13 回型技術協会奨励賞を受賞した．

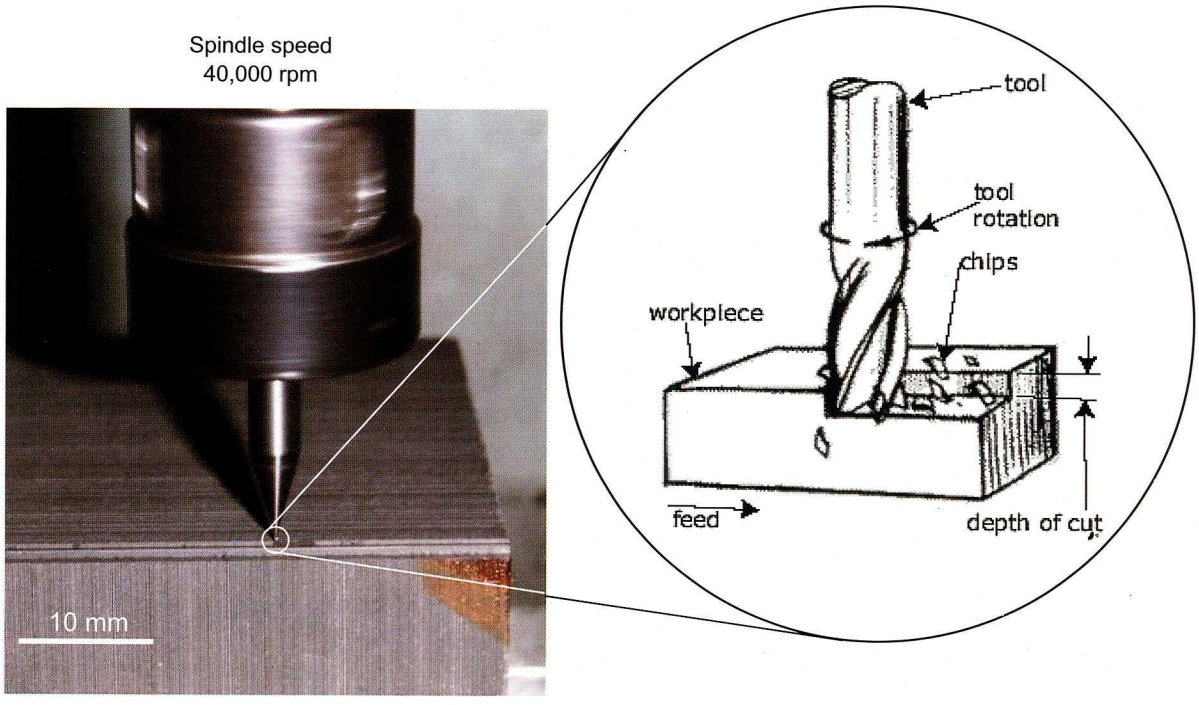


Fig. 1.1 Illustration of milling process at the cutting area by an end-mill.

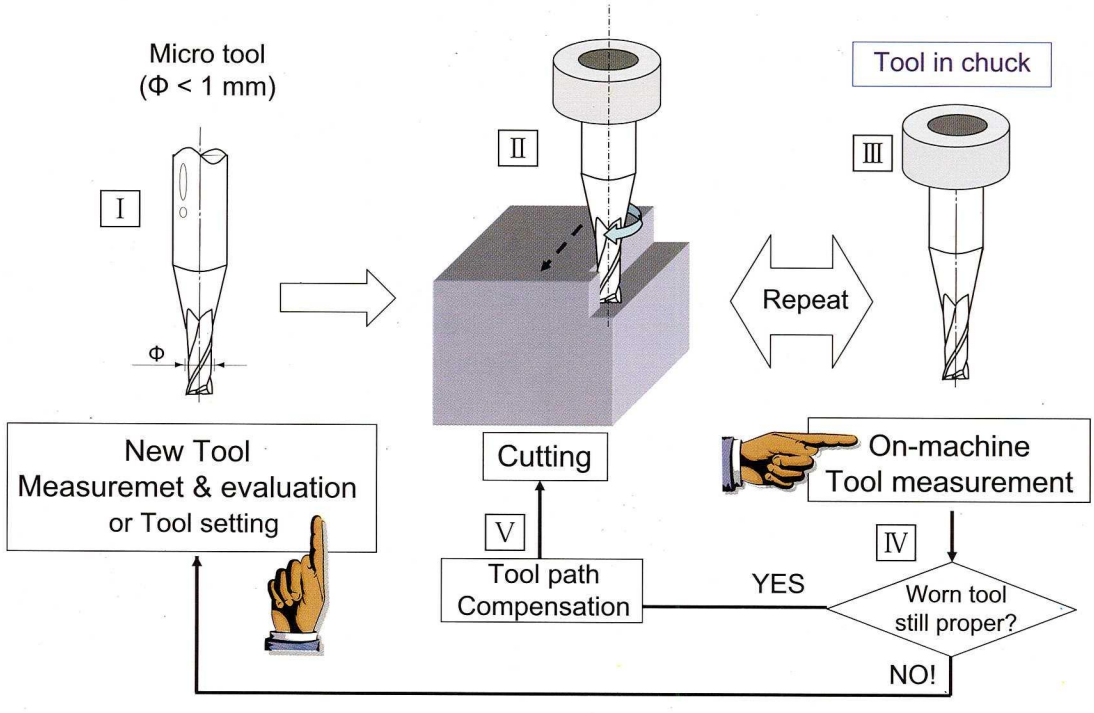


Fig. 1.2 Aim of study.

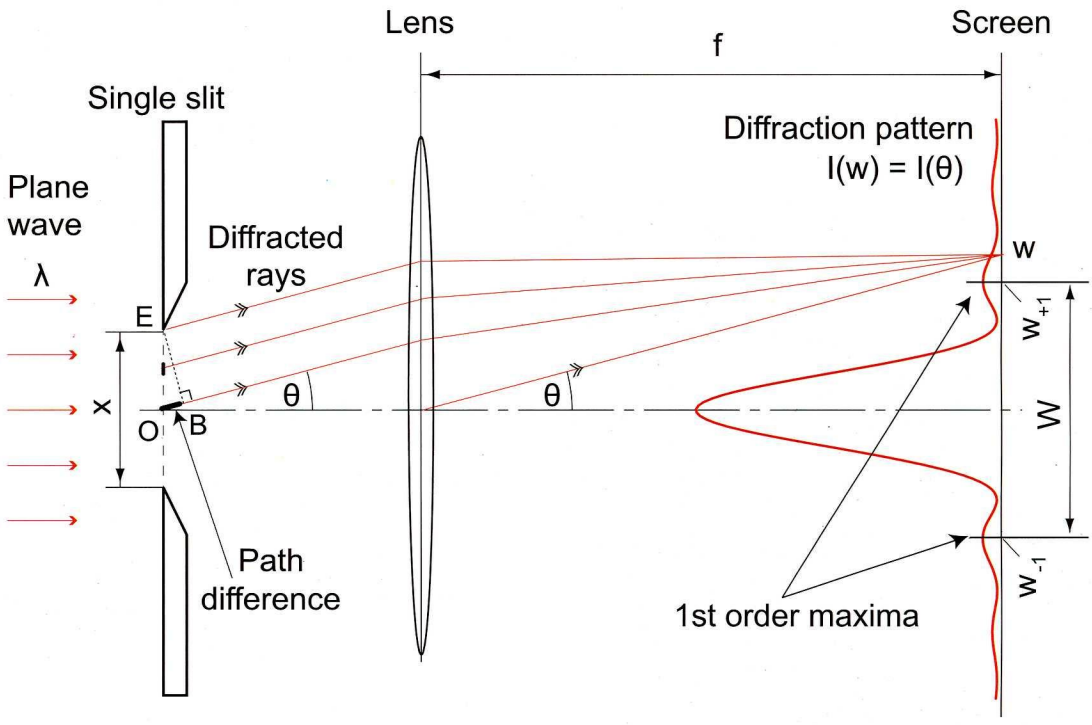


Fig. 2.9 Fraunhofer diffraction of a single slit. The spacing x can be obtained by measuring the width between 1st order maxima W.

$$x(W) = 1.4303\lambda\sqrt{1+\left(\frac{2f}{W}\right)^2}$$

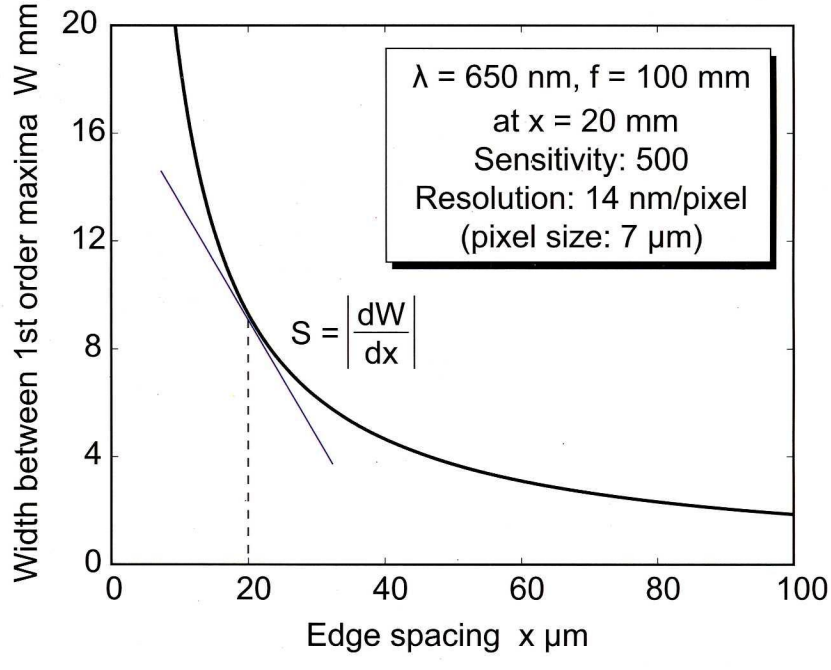
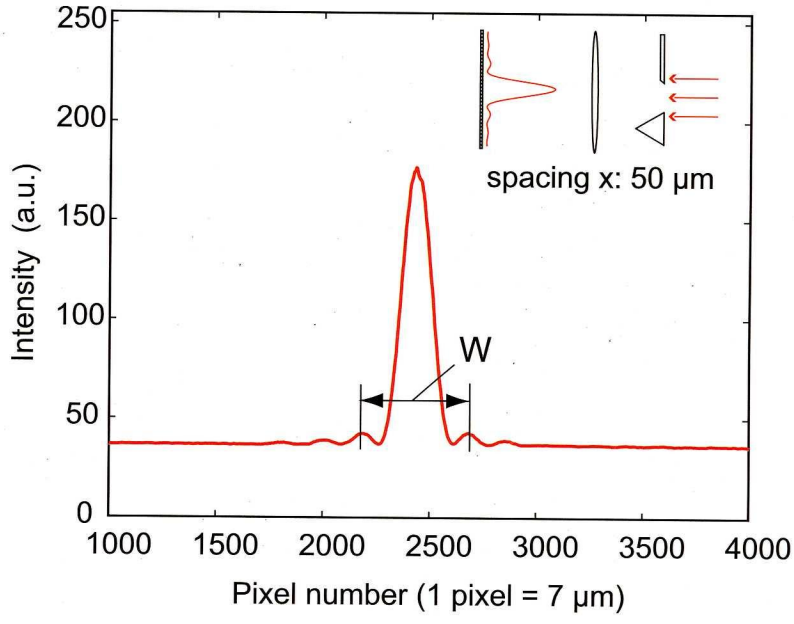
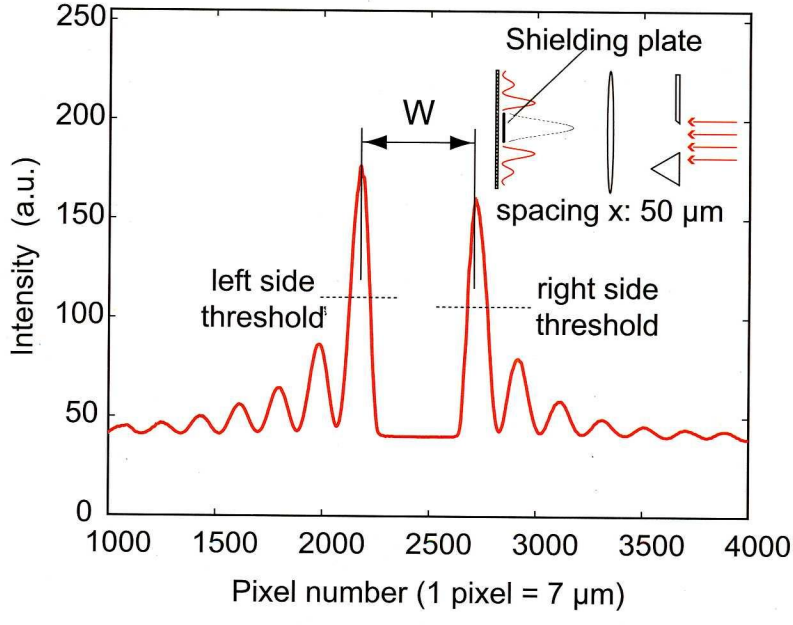


Fig. 2.10 Relationship between the spacing x and the width W.



(a) With principal peak.



(b) Without principal peak.

Fig. 4.7 Detected diffraction pattern for obtaining the width W.

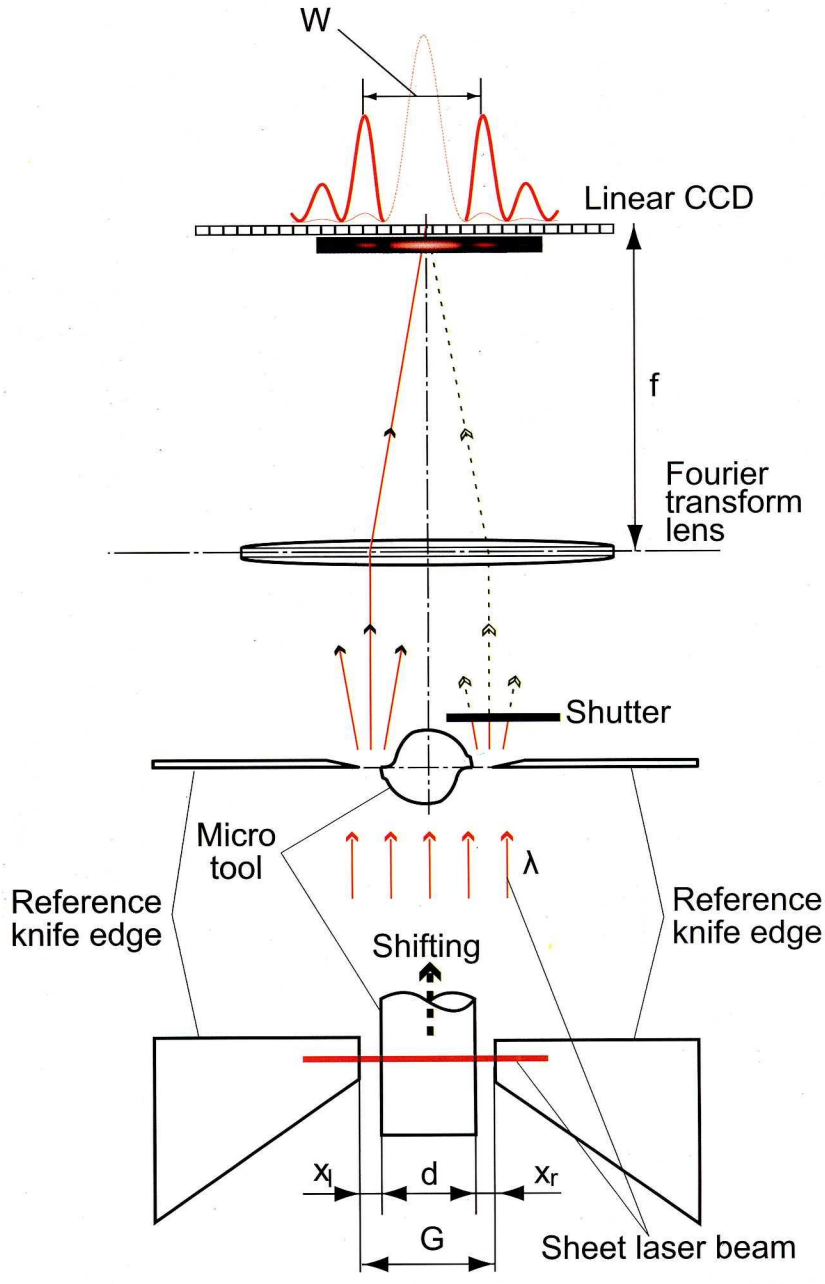
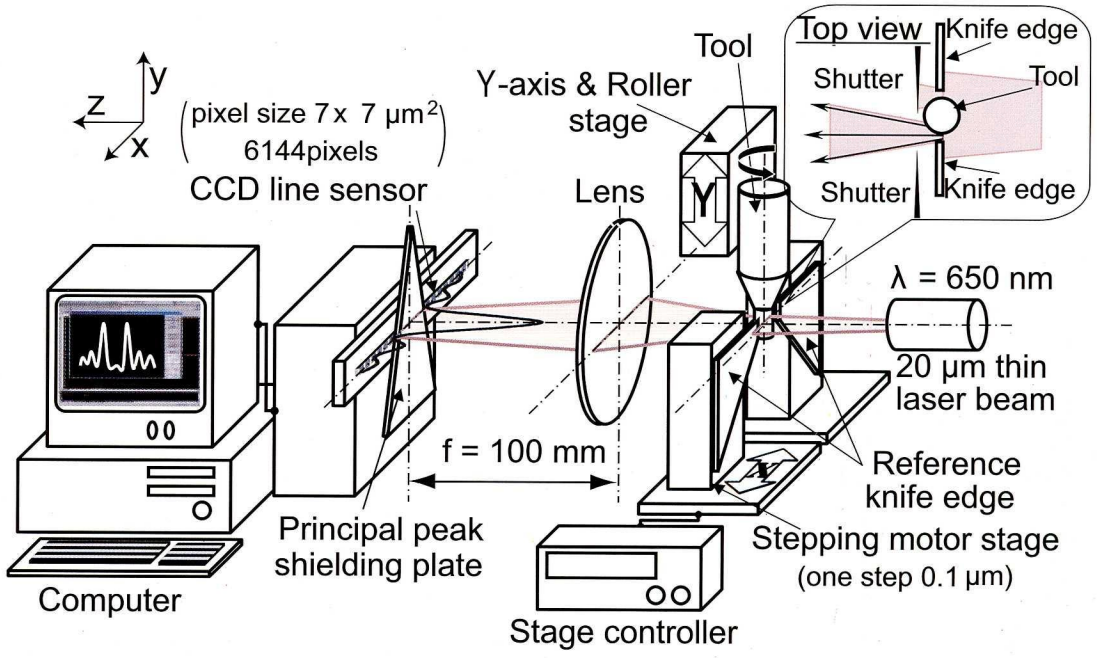


Fig. 3.1 Schematic of diffraction gauge method.



(a) Schematic diagram of experimental setup.

Fig. 3.2 Experimental setup for measuring the tool edge profile using diffraction gauge method.

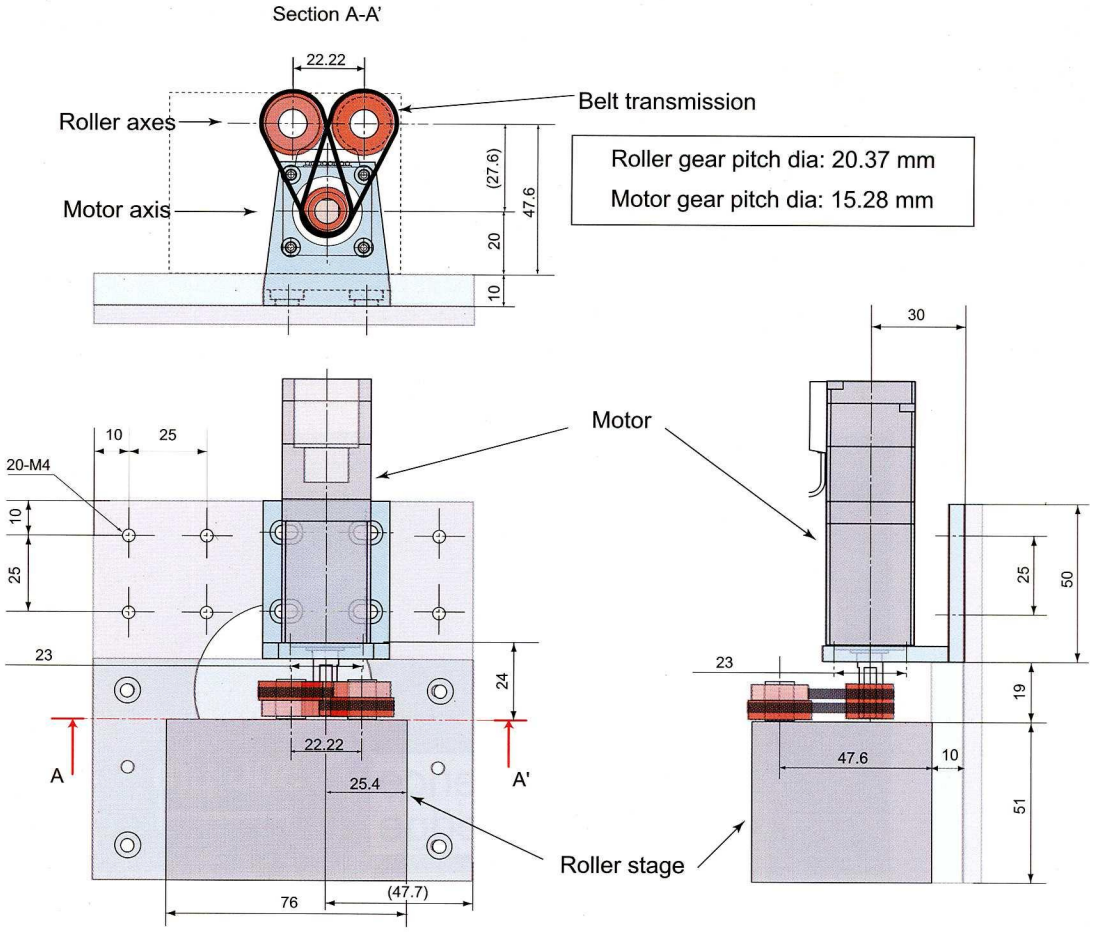
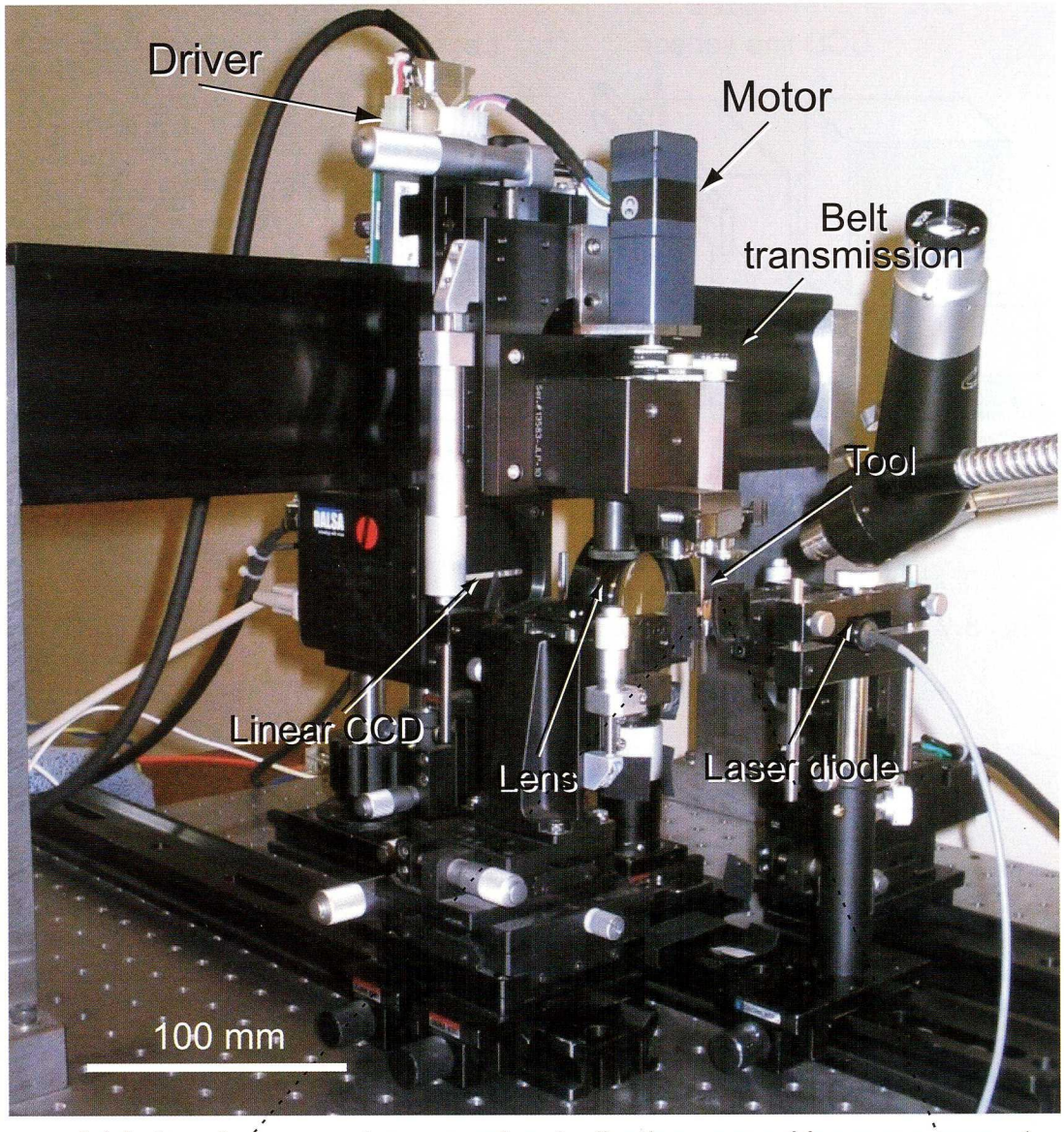
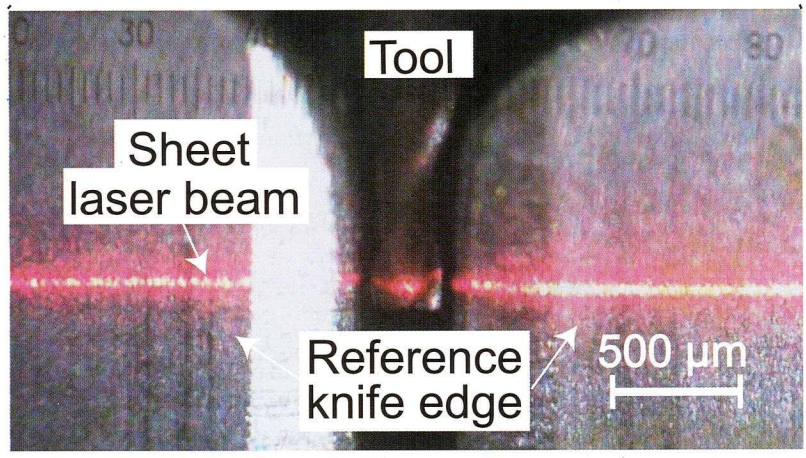


Fig. 7.7 Appending a motor to the roller stage with belt transmission.

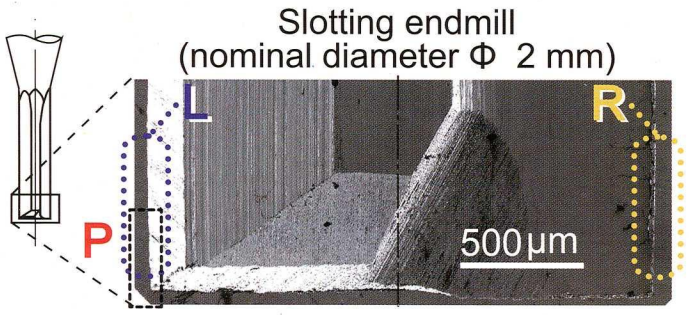


(a) Automated measuring apparatus duplicating on-machine measurement

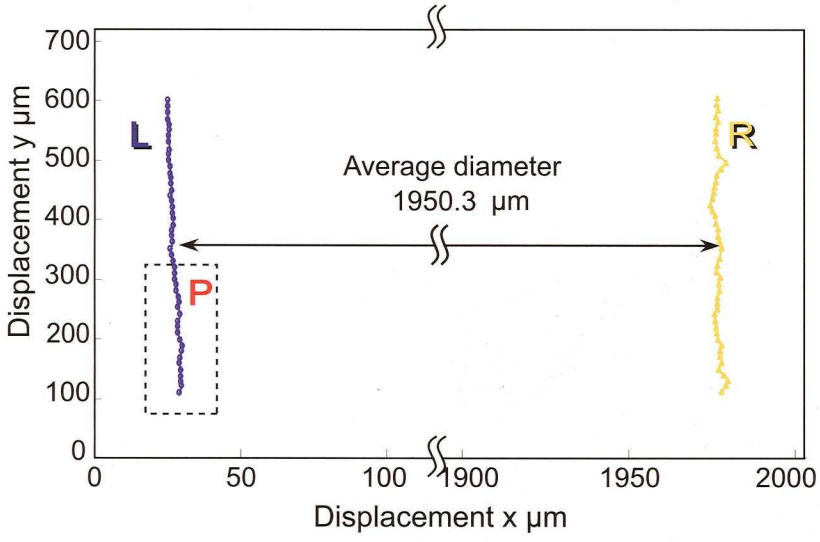


(b) Diffraction guage with micro endmill (Φ 0.3 mm)

Fig. 7.8 Views of developed apparatus with motorized roller stage.



(a) Diagram of a straight flute slotting endmill.



(b) Measurement results.

Fig. 5.2 Profile measurement results of a straight flute slotting endmill, in L and R regions.

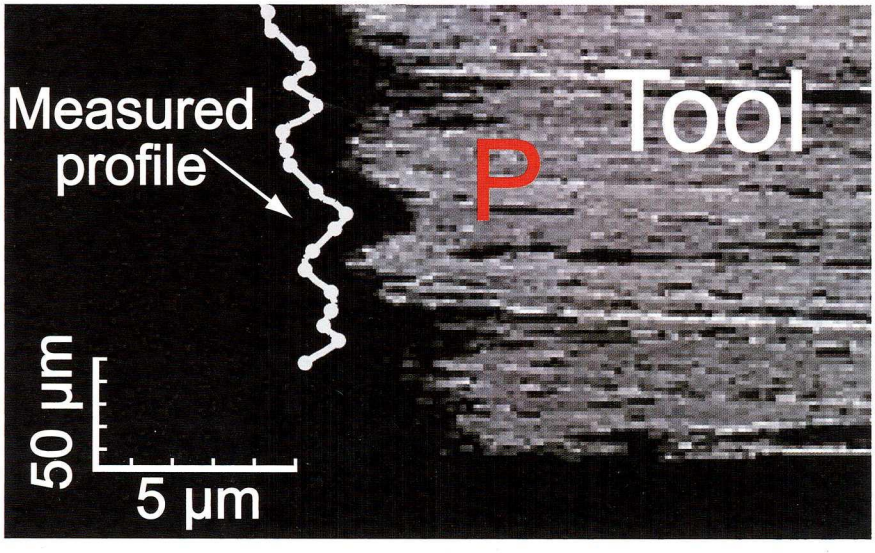


Fig. 5.3 Details of the measured profile comparison with SIM image.

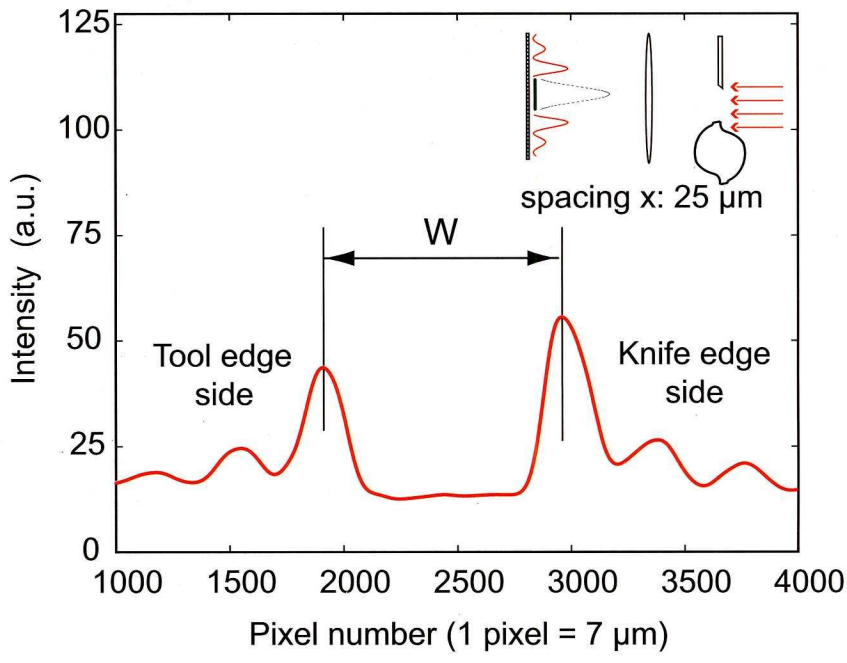


Fig. 5.4 Detected diffraction pattern in measurement of a helical endmill.

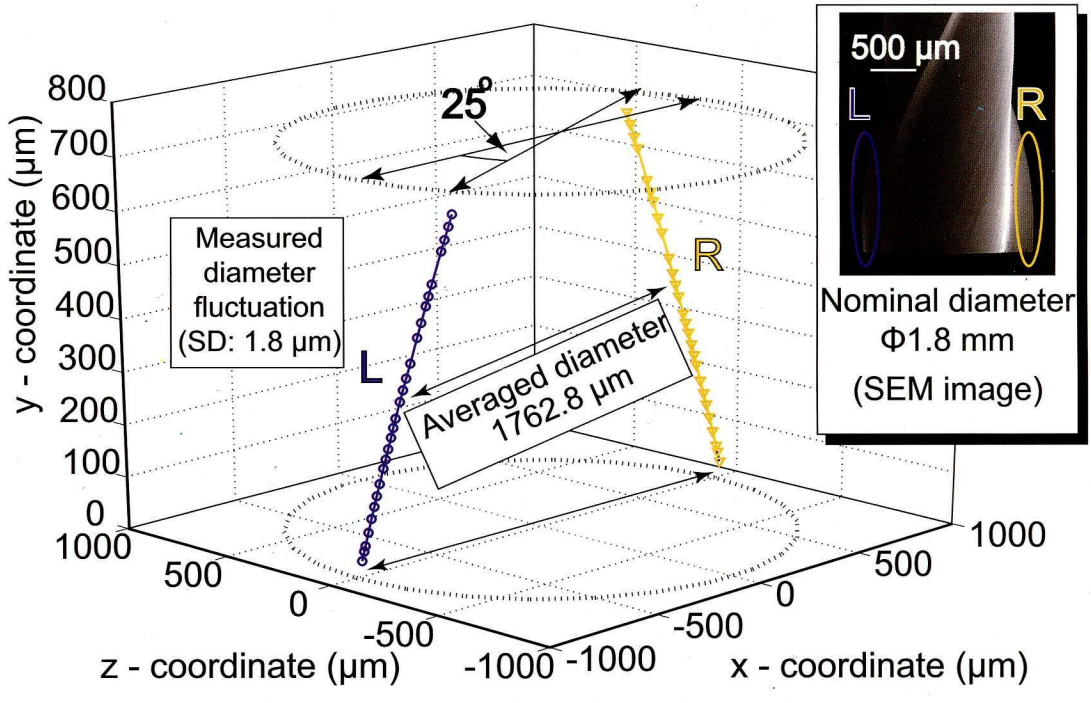


Fig. 5.5 Profile measurement results of a helical flute endmill.

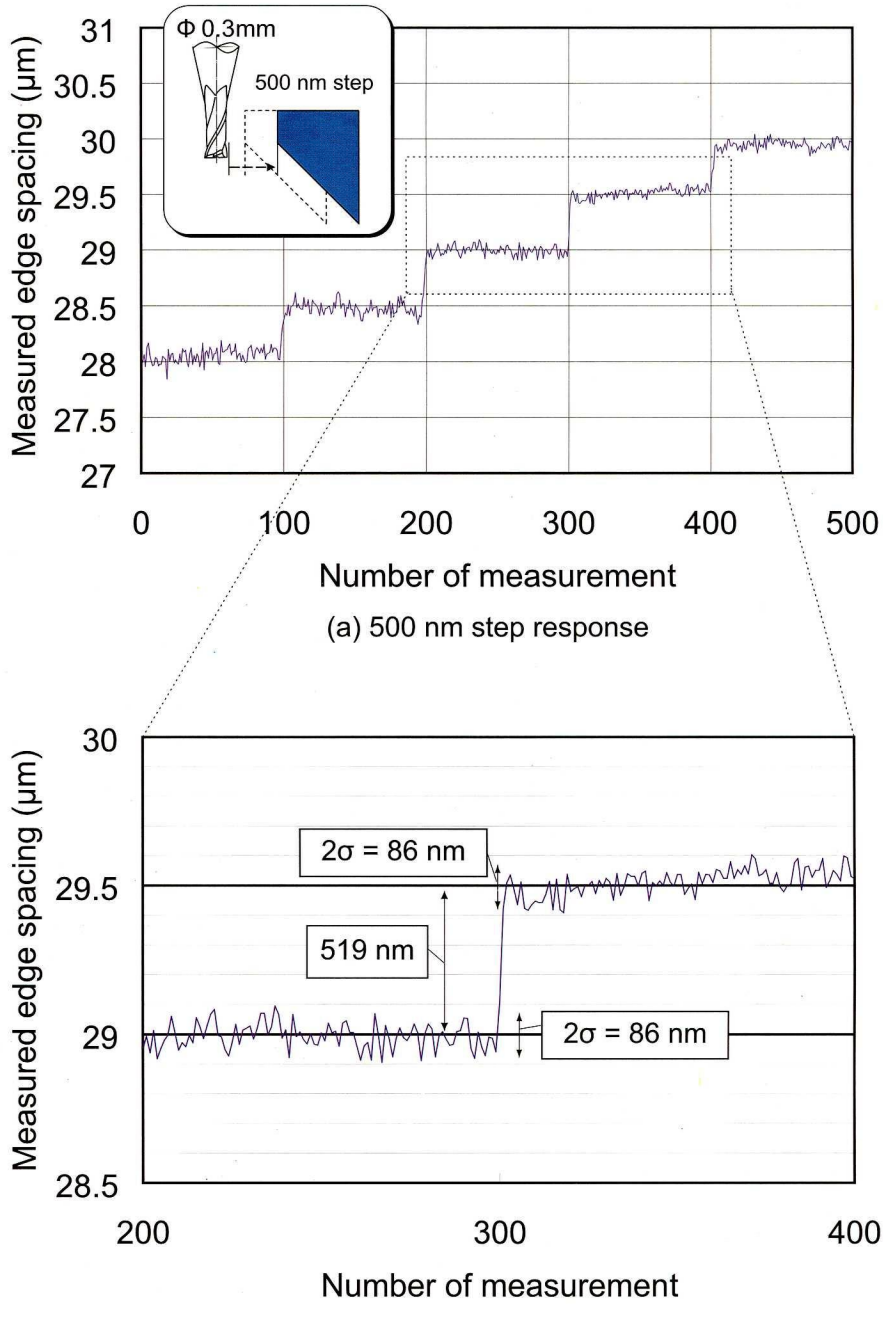


Fig. 6.5 Measurenent result of 500 nanostep response.

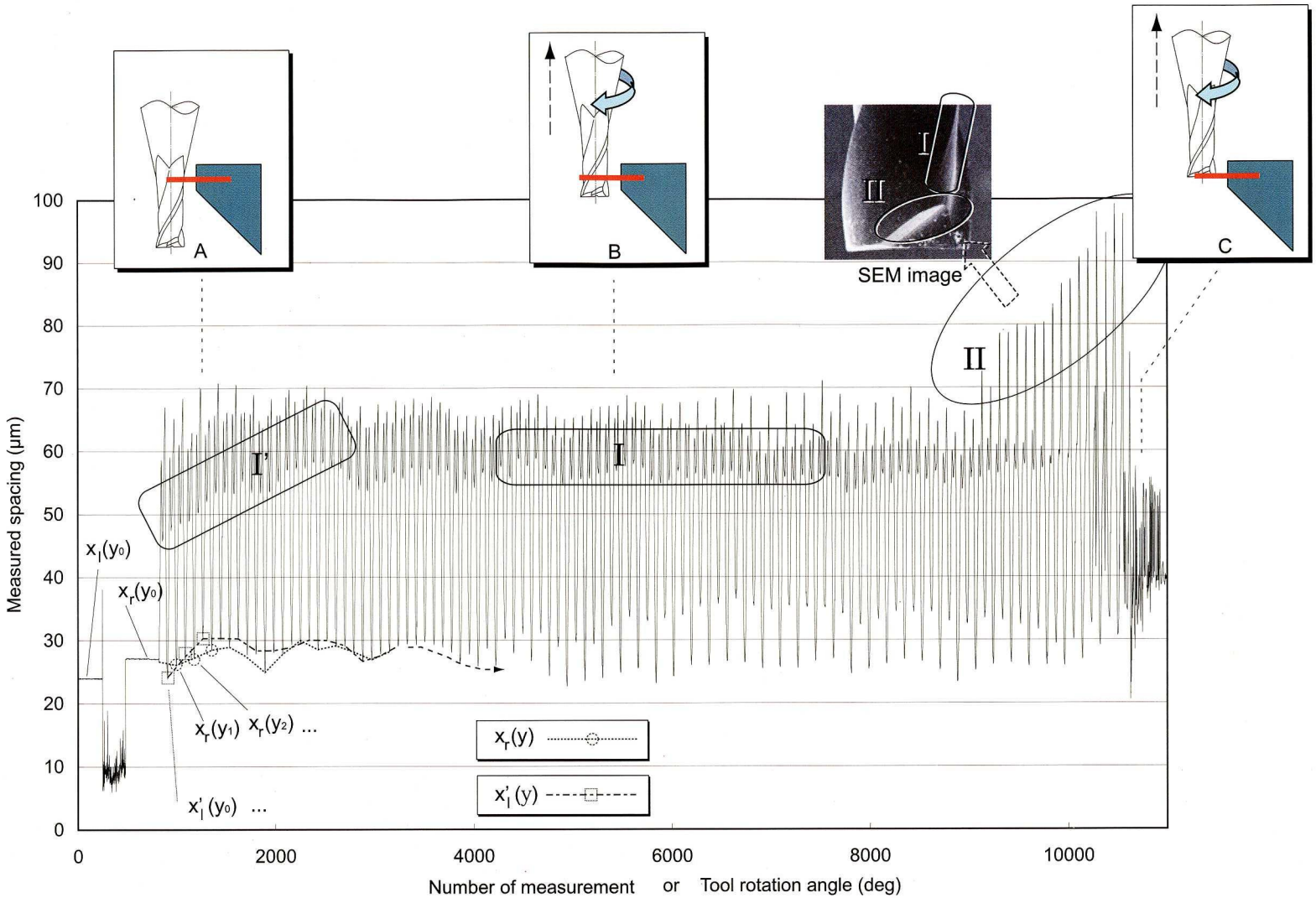


Fig. 7.11 Automated measurement result.

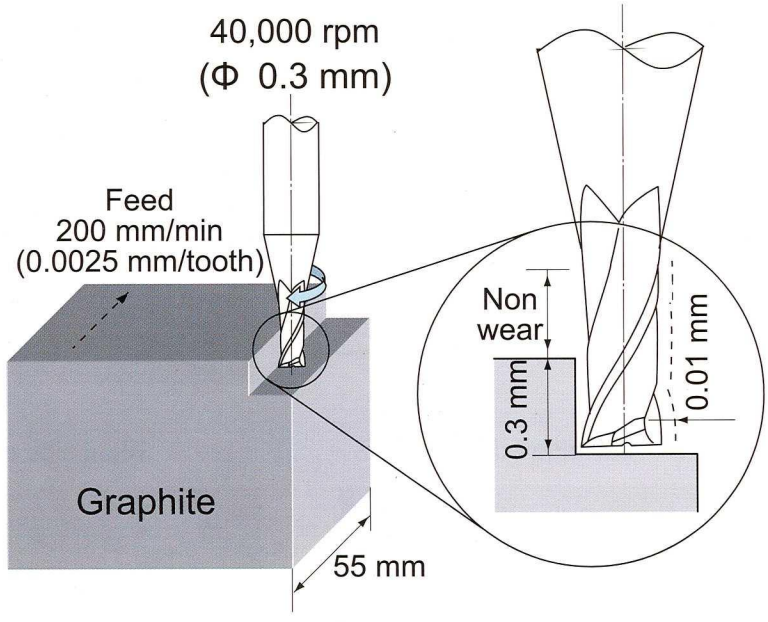


Fig. 6.2 Illustration of side milling in worn experiment.

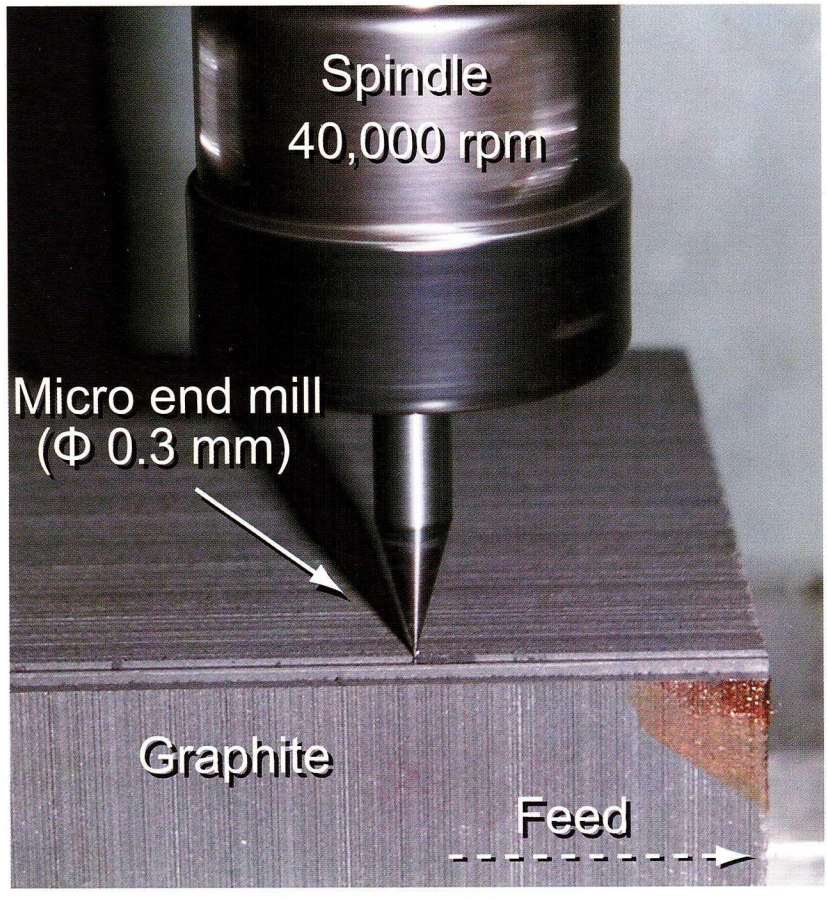


Fig. 6.3 Cutting appearance.

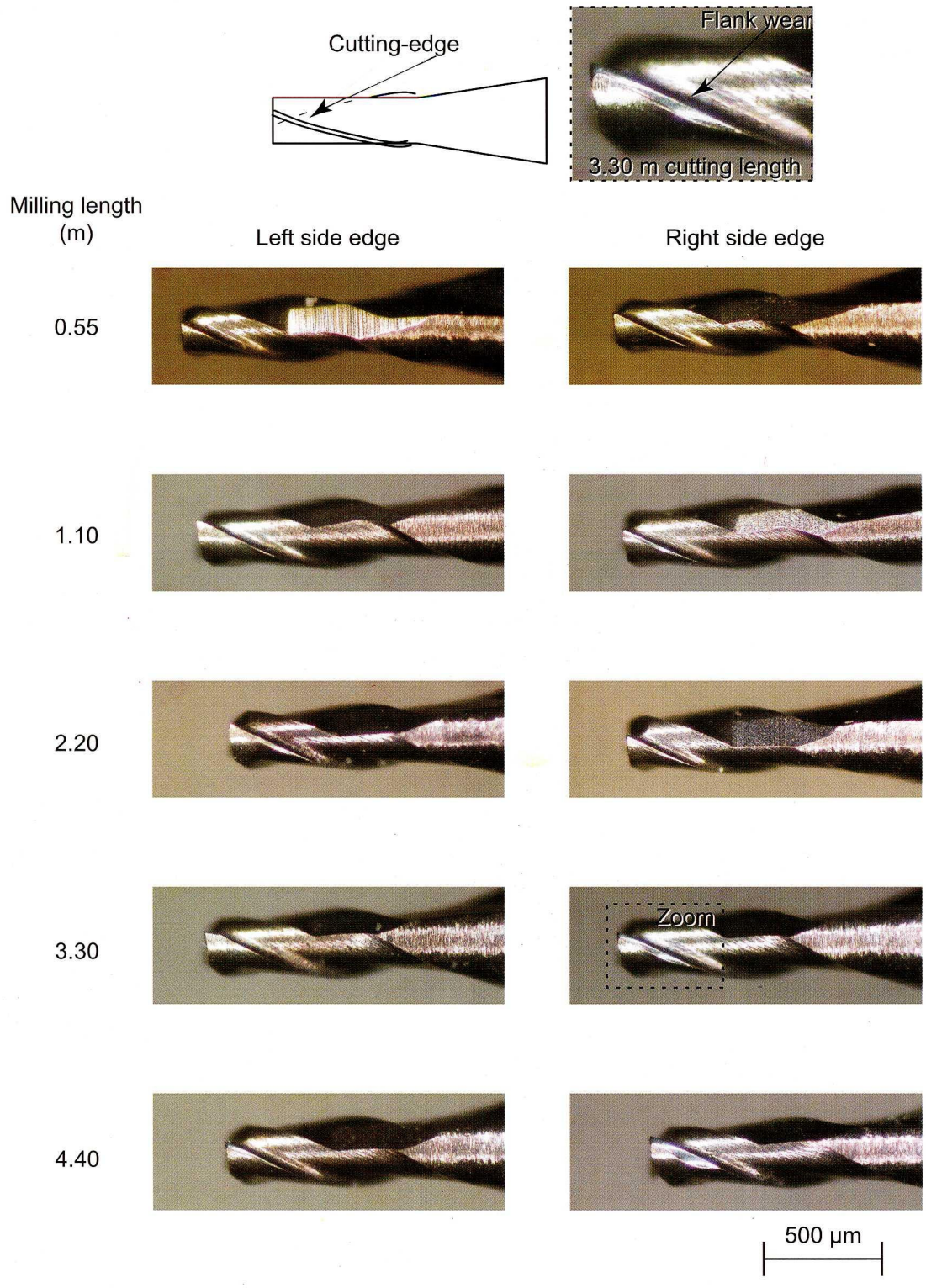


Fig. 6.4 Photographs of micro endmills after cutting.

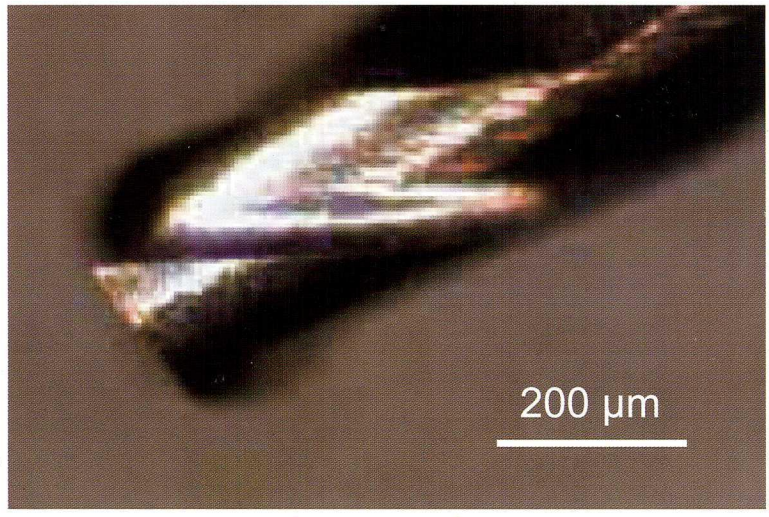


Fig. 7.1 New tool before cutting.

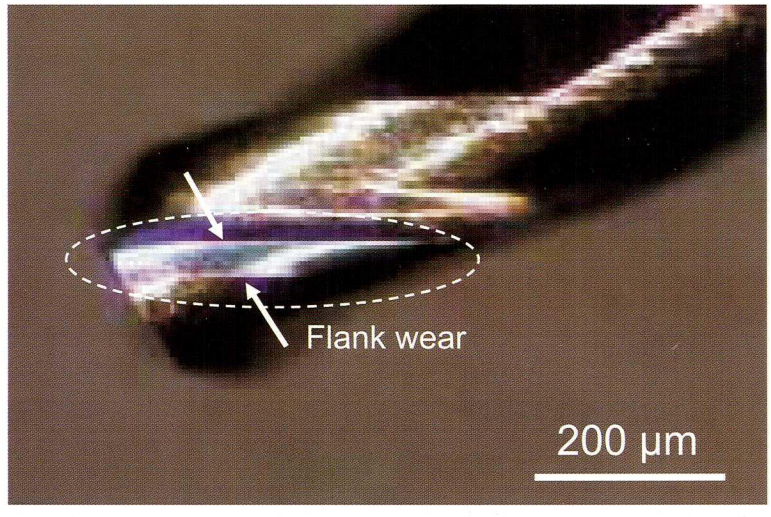


Fig. 7.2 Worn tool after cutting.

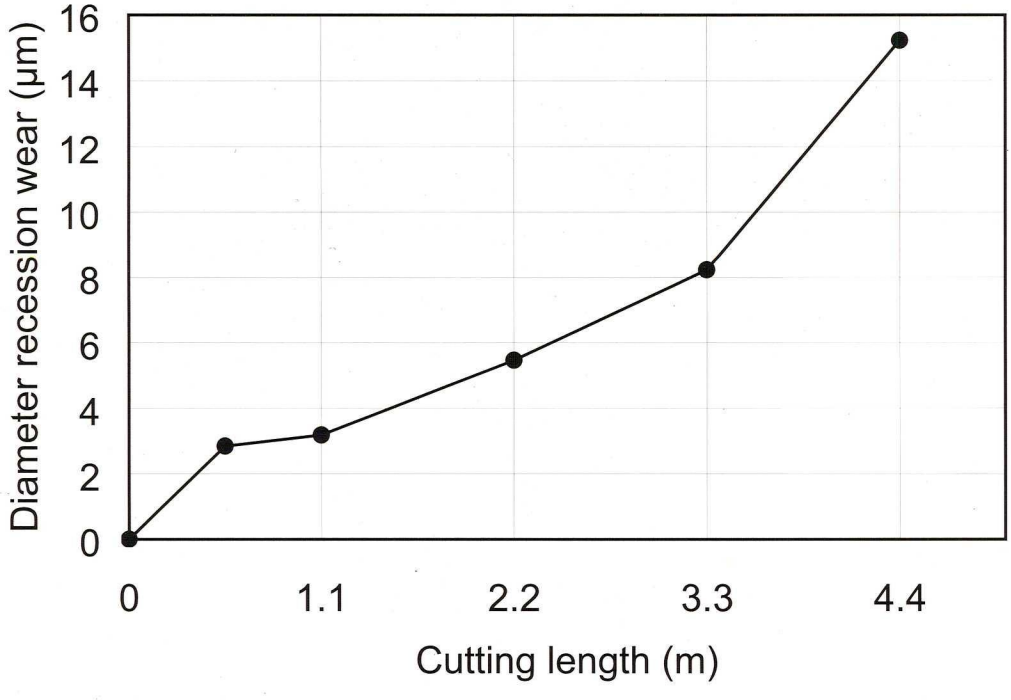


Fig. 8.6 Relationship between tool diameter recession and cutting length.

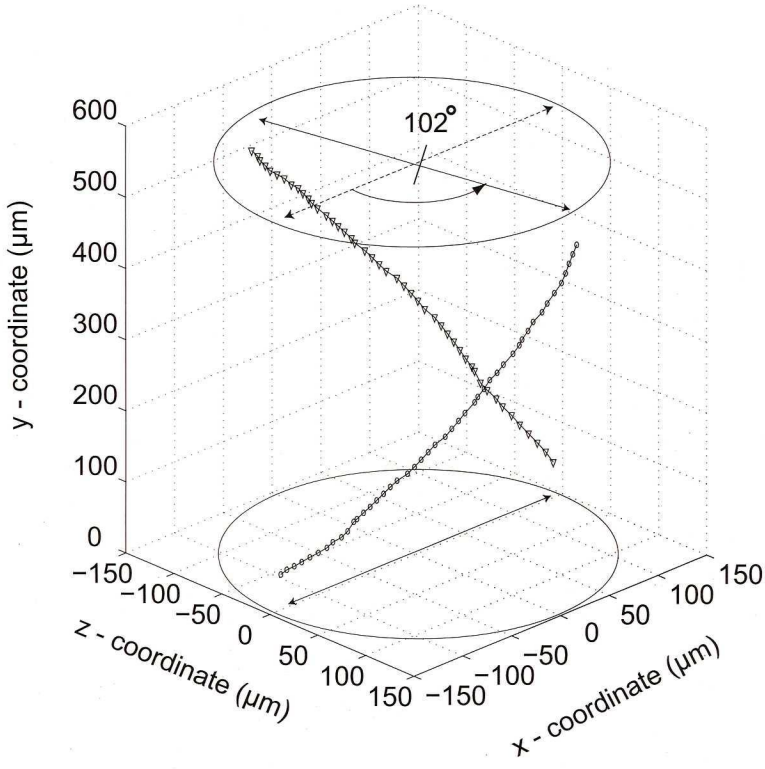


Fig. 8.9 Micro endmill cutting-edge measured profiles.

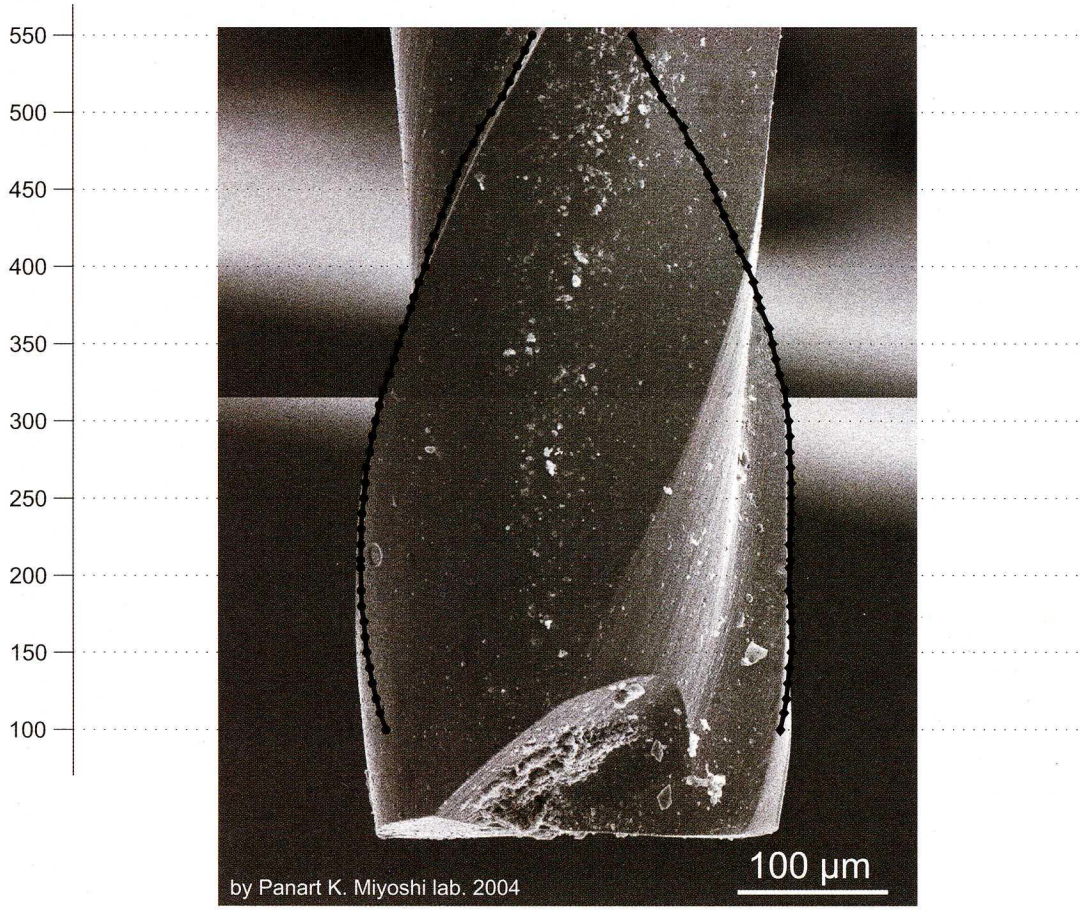


Fig. 8.14 Measured profiles comparison with SEM image.

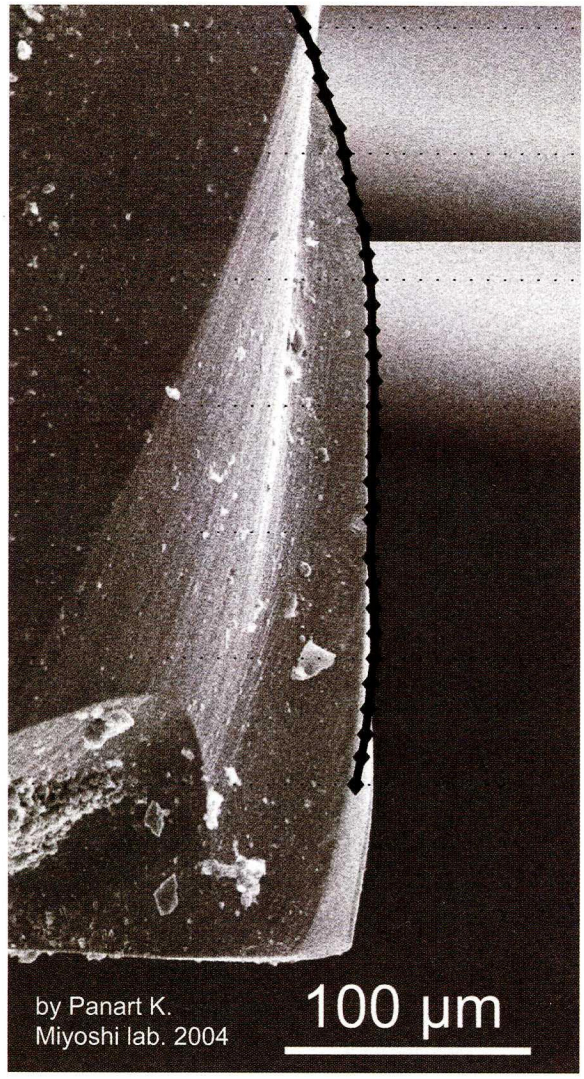


Fig. 8.15 Zoom of the measured result.



Printed by **Saksopa Press**
5/49-5/50 Soi Charoensuk, Chakpra Rd. Talingchan Bangkok 10170, Thailand.
Tel : +66-2-8814132 - 4 Fax : +66-2-8814134