

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

ii

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 cuttingedge profiles for micro-endmill ($\phi < 500 \ \mu$ m) 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 experimental 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 μ m; 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
5.5	3.3.1 計測システムの構成	42
	332 宝験装置	42
	333 投光器によるシート光ビームの特性	44
		× 1

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	小径工具の切れ刈フロファイル計測	67
5.1	裕言	67
5.2	実験方法	68
5.3	直ぐ为小径工具の測定	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
笋6音	極小経工具の歴話宝路	77
2月10年 61	徑小住工 <u>六</u> の库代关款	77
6.2	相日・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	78
0.2	厚代天歌 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	78
	0.2.1 天歌刀伝	10
6 9	0.2.2 岸和徳小性上共の訊件	02 Q1
0.3	944カ摩杙の快山万 件能 · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	04 06
0.4	稻日	80
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 回折ノ	《ターンへの景	響						•••		88
		7.2.2 エッミ	>間隙への影響	ß ř								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 測定プ	方法									96
		7.3.3 測定約	5果.....									98
	7.4	結言				• • •				•••	• •	105
笻	2 音	極小 谷工目の	麻毛切れすフ	᠈ᢅᡨ᠊᠋᠊ᡔ᠆ᢇ	、い言十油	I						107
чr	0 字	▲小庄工 <u>一</u> 、	//==^U ¥J 1 6 /U /		7 C D /R	J						107
	8.2	福日 ・・・・ 摩耗工具の切	・・・・・・・ れ刃後退摩耗	•••• 量		• • •	•••	•••	• •	•••	•••	108
	0.2	▲ エニージ 50 8 2 1 座 挺 1	一旦の直径変化			•••	•••	•••	•••	•••	•••	108
		0.2.1 年和日 8.2.2 切れF	-ハッ 世代のに 1後退摩耗量と	切削長さ	いの関係		•••	•••	•••	•••		113
	8.3	摩耗切れ刃フ	ロファイル									115
	••••	8.3.1 測定手										115
		8.3.2 測定新	課									117
	8.4	結言										124
第	9章	結論										125
第 付	9章 録A	結論 仕様										$125 \\ 131$
第 付	9章 録A A.1	結論 仕様 System part :	specifications									125 131 131
第 付	9章 録A A.1	結論 仕様 System part : A.1.1 Laser	specifications source						•••	•••		125 131 131 131
第付	9章 録A A.1	結論 仕様 System part : A.1.1 Laser A.1.2 Trans	specifications source mission stages	· · · · · ·		· · · ·		 	•••	· · ·	· · · ·	 125 131 131 133
第付	9章 録A A.1	結論 仕様 System part s A.1.1 Laser A.1.2 Trans A.1.3 Linea	specifications source mission stages : CCD	· · · · · ·		· · · ·	· · · ·	· · · · ·	· ·	· · ·	 	 125 131 131 133 134
第付	9章 録A A.1 A.2	結論 仕様 System part : A.1.1 Laser A.1.2 Trans: A.1.3 Linear Rotation stag	specifications source mission stages CCD	· · · · · ·	· · · · ·	· · · ·	· · · ·	· · · · · · ·	•••	· · · ·	· · · · · ·	 125 131 131 133 134 135
第付	9章 録A A.1 A.2	結論 仕様 System part a A.1.1 Laser A.1.2 Trans A.1.3 Linear Rotation stag A.2.1 Motor	specifications source mission stages CCD re unit	· · · · · ·	· · · · ·	· · · ·	· · · · · · · · · · · ·	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	· · · · · ·	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	 125 131 131 133 134 135 136
第付	9章 録A A.1 A.2 A.3	結論 仕様 System part : A.1.1 Laser A.1.2 Trans: A.1.3 Linear Rotation stag A.2.1 Motor Microscope	specifications source mission stages CCD re unit	 		· · · ·	· · · · · · · · · · · ·	· · · · · · · · ·	· · ·	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	· · · · · · · · ·	 125 131 131 133 134 135 136 138
第付	9章 録A A.1 A.2 A.3	結論 仕様 System part a A.1.1 Laser A.1.2 Trans A.1.3 Linear Rotation stag A.2.1 Motor Microscope A.3.1 SEM:	specifications source mission stages CCD e unit Scanning Elec			• • • • • • • • • • • • • • • • • • • •	· · · · · · · · · · · ·	· · · · · · · · · · ·	· · · · · ·	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	· · · · · · · · ·	 125 131 131 133 134 135 136 138 138 138
第付	9章 録A A.1 A.2 A.3	結論 仕様 System part a A.1.1 Laser A.1.2 Trans A.1.3 Linear Rotation stag A.2.1 Motor Microscope A.3.1 SEM: A.3.2 SIM: 3	specifications source mission stages CCD ge unit Scanning Electoria		croscop	• • • • • • • • • • • • • • • • • • • •	· · · · · · · · · · · · · · · ·	· · · · · · · · · · · ·	· · · · · · · · ·	· · · · · · · · ·	· · · · · · · · ·	 125 131 131 133 134 135 136 138 138 138 138
第 付 参	9 章 録 A A.1 A.2 A.3 考文南	結論 仕様 System part a A.1.1 Laser A.1.2 Trans A.1.3 Linear Rotation stag A.2.1 Motor Microscope A.3.1 SEM: A.3.2 SIM: 3	specifications source mission stages CCD re unit Scanning Elec Scanning Ion 1	ctron Microsco		· · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	· · · · · · · · · · · · · · · ·	· · · · · · · · · · ·	· · · · · ·	· · · · · · · · ·	· · · · · · · · ·	 125 131 131 133 134 135 136 138 138 138 138 138 138 138

表 目 次

2.1	The first five maxima of the function $f(\beta) = \left(\frac{\sin \beta}{\beta}\right)^2$
3.1	Specification of beam scan
$\begin{array}{c} 6.1 \\ 6.2 \end{array}$	Micro endmill specifications. 79 Cutting conditions. 80
A.1	Specification of LD element
A.2	Specification of LD drive device
A.3	Specification of laser diode floodlight. (Construction of sheet laser
	beam.)
A.4	Specification of stepping motor controller
A.5	Specification of super tremor x axis stage
A.6	Specification of CCD line sensor
A.7	Specification of roller stage
A.8	Specification of stepping motor
A.9	SEM's main specification
A.10	SIM's main specification

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. \ldots	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 diffrac-	
	tion 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. \ldots	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 μ m to 20 μ m	57
4.6	The principle of 7-point smoothing by moving average fitting	58
4.7	Detected diffraction pattern for obtaining the width $W. \ldots \ldots$	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 $x = 10 \ \mu m$ with 11 times average and their repeatabil-	
	ity 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	Annending a motor to the roller stage with halt transmission	04
	Appending a motor to the roher stage with beit transmission	34

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
7.12	Automated measurement results with rotation runout 104
7.13	Tool rotation runout analysis.
0 1	
8.1	Measured tool diameter on micro endmill with 0.55 m cutting
	length
8.2	1.10 m cutting length
8.3	2.20 m cutting length
8.4	3.30 m cutting length
8.5	4.40 m cutting length
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
8.9	Micro endmill cutting-edge measured profiles
8.10	Measured profiles at rotation of 0 deg. $\ldots \ldots \ldots$
8.11	30 deg
8.12	60 deg
8.13	120 deg
8.14	Measured profiles comparison with SEM image
8.15	Zoom in of measured results certify the validity of measurement 123
A.1	Roller stage dimensions
A.2	Motor dimensions
A.3	Driver dimensions
A.4	Torque at various rotational speed

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]}.

- 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.
- 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.

- 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.
- 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<u>オンマシン</u>[†]において,<u>サブマイクロメートル</u>(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1µm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(*d* 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.
 - 一 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.
- 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.
- 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.

- 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.

 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 E と磁界 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 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、 $\varepsilon \ge \mu$ 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.

$$\frac{1}{v^2} \frac{\nabla^2 u(\mathbf{r})}{u(\mathbf{r})} = \frac{1}{T(t)} \frac{d^2 T(t)}{dt^2} \quad \left(= - 定 数^2 と お く \right)$$
(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 $k = \frac{\omega}{v} = \frac{2\pi}{\lambda}$ 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.

 $[\]frac{d^2T(t)}{dt^2}$ + 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 = 1 $2\pi/\lambda$ 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、

$$\iiint_{V} (U\nabla^{2}W - W\nabla^{2}U)dV = \oint_{S} (U\nabla W - W\nabla U) \cdot d\mathbf{S}$$
(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.

$$\oint_{S} (U\nabla W - W\nabla U) \cdot d\mathbf{S} = 0$$
(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、

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.

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

そして, $r \rightarrow 0$ 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

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

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

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

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

$$\nabla U = \frac{\partial U}{\partial n} \hat{\mathbf{n}} = \frac{\partial}{\partial n} \left(\frac{A e^{i k r_0}}{r_0} \right) \hat{\mathbf{n}}$$

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,

$$\frac{\partial U}{\partial n} = \frac{Ae^{ikr_0}}{r_0} \left(\frac{1}{r_0} - ik\right) \cos(n, r_0) \approx -\frac{ikAe^{ikr_0}}{r_0} \cos(n, r_0)$$
(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, S₂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. S₃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

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

で得られる. これは <u>Fresnel - Kirchhoff の回折公式</u> (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

$$r \approx r_{0} - \frac{x\xi + y\eta}{r_{0}} + \frac{\xi^{2} + \eta^{2}}{2r_{0}} - \frac{(x\xi + y\eta)^{2}}{2r_{0}^{3}} - \cdots$$

$$r' \approx r_{0}' - \frac{x'\xi + y'\eta}{r_{0}'} + \frac{\xi^{2} + \eta^{2}}{2r_{0}'} - \frac{(x'\xi + y'\eta)^{2}}{2r_{0}'^{3}} - \cdots$$

$$\left.\right\}$$

$$(2.18)$$

の関係を用いると

$$U(P) = \frac{i\cos\delta}{\lambda} \frac{Ae^{ik(r_0+r'_0)}}{r_0r'_0} \iint_S e^{ikf(\xi,\eta)} d\xi d\eta$$
(2.19)

が得られる.ただし,

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

である.ここで,

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

によって,式(2.20)は

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

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

$$|r_0| \gg \frac{(\xi^2 + \eta^2)_{\max}}{\lambda} \quad , \quad |r'_0| \gg \frac{(\xi^2 + \eta^2)_{\max}}{\lambda}$$
 (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

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

ここで

$$p = l - l'$$
 , $q = m - m'$ (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

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

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

 $g(\xi,\eta) = A(\xi,\eta)e^{i\phi(\xi,\eta)}$ 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 Io とすれば,式 (2.26) を用い

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

$$l' = -\frac{x'}{r'_0} \approx -\frac{x'}{f'}, \quad l = \frac{x}{r_0} \approx \frac{x}{f}, \quad m' = -\frac{y'}{r'_0} \approx -\frac{y'}{f'}, \quad m = \frac{y}{r_0} \approx \frac{y}{f}$$
 (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

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

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

$$U(w) = C \int\limits_{-x/2}^{x/2} \exp\left\{-irac{2\pi}{r_0\lambda}(w\xi)
ight\} d\xi$$

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 $I = |U|^{2\ddagger}$ により

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

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

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, $f \in r_0$ 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

$$rac{d\,f(eta)}{deta}=rac{2\sineta\cdot(eta\coseta-\sineta)}{eta^3}=0$$

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

$$\beta \cos \beta - \sin \beta = 0 \quad \sharp \, \varkappa \, \tan \beta = \beta \tag{2.35}$$

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 $\beta \approx \pm 1.4303\pi, \pm 2.4590\pi, \pm 3.4707, \dots$ 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 $f(\beta) = \left(\frac{\sin \beta}{2}\right)$

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.

$$I(\theta) = I_0 \left(\frac{\sin\beta}{\beta}\right)^2 = I_0 \operatorname{sinc}^2(\beta)$$
(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 $w_{\pm 1}$ は位相差 β が ±1.4303 π のときであり ^{[22],[25],[30]},式(2.37) により、sin θ = ±1.4303 λ/x をとり、 $w_{\pm 1}$ は

$$w_{\pm 1} = f \tan\left[\arcsin\left(\frac{\pm 1.4303\lambda}{x}\right)\right]$$
 (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.

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

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

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

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

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

となる.式(2.36)を拡張した回折パターンは

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

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、

$$w'_{\pm 1} = f \tan\left[\arcsin\left(\frac{\pm 1.4303\lambda - \Delta z}{\sqrt{(\Delta z)^2 + x^2}}\right) + \arctan\frac{\Delta z}{x} \right]$$
(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 μ m であるとき, エッジ間隙が 15 μ m ~ 35 μ m 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 $x = 15 \ \mu m$ 、 $\Delta z = 5 \ \mu m$ 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 μ m) 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 μ m であるとすると,エッジ間 隙が 50 μ m 以下であれば,測定分解能は 0.1 μ m 以下になることがわかった.さ らに,エッジ間隙が 15 μ m 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 μ m 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 μ m×7 μ m;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 μ m 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 μ m になり^[29]、約 20 μ m 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 μ m の位置にあることと等価で,曲 率が 1/58320~1.7×10⁻⁵ μ m⁻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 μ m 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.

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	$1 \ \mu m imes 4 \ mm$	
Scale Selection	小数点以下第一位 (20 回平均)	
Clip Level	$13.5\% (\approx 1/e^2)$	

 Table 3.1
 Specification of beam scan.

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;φ1.8 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 μ m 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 μ m から 20 μ m までの回折パターンの変化を、20 μ m 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.



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



Fig. 4.4 Smoothed diffraction pattern.

<u>55</u>







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、

$$I_{\rm out}(i) = \frac{1}{N} \sum_{j=-m}^{m} I_{\rm in}(i+j)$$
(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.



(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 μ m 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 μ m ~ 50 μ m 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 $x \ge 10 \ \mu m$ ずつ変化させ,1次光間隔 $W \ge$ 測定した.その結果は図 4.8(a)の Δ 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 の〇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 μ m~ 50 μ m の範囲で 40 nm 以下、特に $x = 30 \mu$ m 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.



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 μ m における回折パターンの変化を さらに詳しく調べた. 10 μ m の近傍で 0.1 μ m ごとに刃先ー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,実験結果は刃先ー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 μ m に 対して,1次光間隔が約 400 μ m 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 μ m である ことがら,分解能を計算すると (7 μ m/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 $x = 10 \ \mu \text{m}$ 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.



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(φ1.8, 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(φ1 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 μ m) 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.

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

Table 6.1Micro endmill specifications.



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

Table 6.2Cutting conditions.

Cutting method		Side milling
Rotational speed	rpm	40,000
Cutting speed	$\rm mm/min$	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 μ m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 μ m)設定しなければならないため,±5 μ m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:2 σ)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.





Fig. 6.5 Measurement result of 500 nanostep response.

85

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 ϕ 0.3 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(± 5 μ m)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(φ1.8 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φ0.3 mmの極小径エンドミルを挿入している状態を表 わす.



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.
- 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.)
- 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6µm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,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.





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 μ m程度(工具とローラステージとの回転状態に より±1.5 μ m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、 $x'_l(y) \ge x_r(y)$ 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 $x_r(y_1), x_r(y_2), \dots$ 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.

101

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、

$$x_l(y) = x_l(y_0) + [x'_l(y_0) - x'_l(y)]$$
(7.3)

$$= [x_l(y_0) + x'_l(y_0) - \mathfrak{X}'_l(y)] - \epsilon(y)$$
(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, ...である.)

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

$$\epsilon(y_{n+\frac{1}{2}}) = \frac{x_l'(y_n) - x_l'(y_0)}{2} + \frac{x_r(y_{n+1}) - x_r(y_0)}{2}$$
(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 ± 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(φ0.3 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 μ m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 μ m 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、

$$d(y) = G - [x_l(y) + x_r(y)]$$

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

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

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.

111



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 $\pm 2 \mu m$ 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.



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

ー例として切削長さ 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. 8.13 120 deg.

121



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(ϕ 0.3mm)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(φ1.8 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(φ2.0 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(φ0.3 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(± 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(ф0.3 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、±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(φ0.3 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.

- (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

LD 素子: 東芝製 TOLD9443MC					
駆動極性		+単一電源タイプ			
パックージ	$\mathbf{m}\mathbf{m}$	$\phi 5.6$			
波長	$\mathbf{n}\mathbf{m}$	650			
出力	mW	10			

 ${\bf Table \ A.1} \ \ {\rm Specification \ of \ LD \ element.}$

Table A.2Specification 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		$\phi 15 \mathrm{~mm} imes 51 \mathrm{~mm}$
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		$0\sim 250000$
スピード設定	Pulse/sec	$1 \sim 16000$
加減速レート	$\mu \mathrm{sec}/\mathrm{PPS}$	$0 \sim 999$
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.

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	$\mu { m m}$	真直度 2
		ピッチング 20″,ヨーイング 10″
分解能	$\mu { m m}/パルス$	微動≈0.05 (ハーフステップ)
繰り返し位置決め精度	$\mu { m m}$	0.2 (微動部)
ロストモション	$\mu { m m}$	1 (微動部)

超微動 x 軸ステージ: SURUGA SEIKI 製 R10-60R
A.1.3 Linear CCD

Line Scan Camera : DALSA Piranha CL-P4		
Resolution	pixel	6144
Pixel size	$\mu { m m}^2$	7×7
Aperture		37.31 mm \times 7 $\mu{\rm m}$
Data rate		2 $ imes$ 25 MHz
Max. Line/Frame rate	kHz	7.9
Data format		2 \times 8–bit LVDS
${\rm Responsivity}^\dagger$	$\mathrm{DN}/(\mathrm{nJ}/\mathrm{cm}^2)$	20.6
Dynamic Range		207:1
Operaing temperature	°C	0 - 50
Power supply	V	12 - 15

 Table A.6
 Specification of CCD line sensor.

 $^{^\}dagger$ 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.

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)

Roller stage : Universal punch JLP-10

A.2.1 Motor unit

Table A.8 Specification of stepping m

200PP		
Motor & Driver package		ASC34AK-50
Motor type		Harmonic geared
Frame size	mm	28
Maximum holding torque	N·m	1.5
$\operatorname{Resolution}^{\ddagger}$	deg/pluse	0.00072
Gear ratio		50
Permissible torque	$N \cdot m$	1.5
Max torque	$N \cdot m$	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.)	$\mathbf{m}\mathbf{m}$	0.075
Perpendicularity (T.I.R.)	$\mathbf{m}\mathbf{m}$	0.075
Power supply	V	DC 24 $\pm 10\%$
	А	1.0
Ambient Temperature	$^{\circ}$	$0-40 \ ({ m nonfreezing})$
Ambient Humidity	%	< 85
Driver's input pluse frequency	kHz	$250 (\mathrm{Max})$
Driver's control command		Pluse train input

Stepping Motor : Oriental motor α STEP ASC Series

^{*} 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.
-----------	-------	------	----------------

二次電子像分解能	nm	3.5
加速電圧	kV	0.3 - 30
		imes 18 - imes 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)

SEM: JEOL JSM-5800A

A.3.2 SIM: Scanning Ion Microscope

Table A.10 SIM's	main s	pecification.
------------------	--------	---------------

イオン源		Ga液体金属
加速電圧	kV	15-30 (常用:30)
倍率(on 17"display)		imes 75 - imes 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

SIM : Seiko Instruments SMI9200

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 $\sharp \vartheta$.
- [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.walterag.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., (Cambridge 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, 107, 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.





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)





(a) Diagram of a straight flute slotting endmill.



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.



(b) Zoomed result shows the measurement repeatability and resolution

Fig. 6.5 Measurement result of 500 nanostep response.



Fig. 7.11 Automated measurement result.

Measured spacing (µm)



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