

377.5

K-11

2-55

実験的誤差モデルによる旋削加工の 高品位化に関する研究



九州工業大学附属図書館



10276574

九州工業大学

浅尾 晃通

目 次

第1章 序論	1
1.1 本研究の背景	1
1.2 本研究の目的	6
1.3 本論文の構成	10
第1章の参考文献	12
第2章 オンマシンによる旋削加工誤差測定	14
2.1 緒言	14
2.2 旋盤の幾何誤差測定	16
2.2.1 測定原理	16
2.2.2 レーザ寸法測定器による測定	24
2.3 工具摩耗の影響	28
2.4 切削抵抗の影響	31
2.4.1 切削抵抗	31
2.4.2 工作物のたわみ	32
2.4.3 工具のたわみ	34
2.5 工具熱膨張の影響	37
2.5.1 切削熱	37
2.5.2 工具熱膨張の測定方法	38
2.5.3 工具熱膨張の測定結果	40
2.6 その他の加工誤差要因	42
2.7 第2章のまとめ	43
第2章の参考文献	45
第3章 オンマシンによる旋削加工誤差補正システムの開発	47
3.1 緒言	47
3.2 NC命令修正方式による補正	49
3.2.1 補正方法	49
3.2.2 NC装置の切り込み方向信頼性	52
3.3 人工ニューラルネットワークによる加工誤差のデータベース化	57
3.3.1 人工ニューラルネットワークの概念	57
3.3.2 人工ニューラルネットワークによる加工誤差の学習	60

3.3.3	人工ニューラルネットワークによる加工誤差の推定	64
3.3.4	補正加工実験	67
3.4	第3章のまとめ	69
	第3章の参考文献	71
第4章	微小切削での表面粗さ	73
4.1	緒言	73
4.2	切削仕上げ面特性	75
4.3	切削条件の影響	78
4.3.1	送りの影響	78
4.3.2	ノーズ半径の影響	83
4.3.3	工具材種の影響	85
4.3.4	切り込みの影響	87
4.4	仕上げ面の改善	92
4.4.1	切削油剤の利用	92
4.4.2	フラットノーズ工具の利用	99
4.5	第4章のまとめ	102
	第4章の参考文献	105
第5章	総合旋削システムの開発	107
5.1	緒言	107
5.2	自動プログラミングシステム	112
5.2.1	ハードウェア構成	112
5.2.2	形状データ入力	116
5.2.3	工具選択	118
5.2.4	工具経路変更点の算出	119
5.2.5	加工例	122
5.3	オンマシンによる加工誤差自動測定システム	124
5.3.1	自動測定機能	124
5.3.2	測定用工具経路生成	125
5.3.3	ハードウェアおよびソフトウェア構成	127
5.4	加工誤差補正機能	131
5.4.1	データベース利用による誤差予測	131
5.4.2	テーパ形状工作物の場合	133
5.4.3	溝および段付き形状工作物の場合	134
5.5	第5章のまとめ	137
	第5章の参考文献	140

第6章 結論	141
6.1 本論文の要約	142
6.2 今後の課題	146
第6章の参考文献	148
謝辞	

第1章 序論

1.1 本研究の背景

切削加工は数多く存在する金属加工法の一つにすぎないが、全加工法の70%～80%を占めるといわれ¹⁾、2位の研削加工に比べその比率は圧倒的に高い。機械設備の機種別構成比で切削加工は、金属工作機械が46%を占め、2位の第二次金属加工機械（プレス機、鍛造機、せん断機など）の18%を大きく上回る。さらに、金属加工用工作機械の中でも切削加工に関わる工作機械（旋盤、フライス盤など）は58%にも及ぶ²⁾。

近年、家電・自動車業界等からの要求として、機械部品の小型化・高機能化・高寿命化や納期短縮・コストダウンがあり、これらに対応するため切削加工の分野では素材・工作機械・工具・加工法などに様々な技術が求められている。切削加工は以下の点において、他の金属加工法に比べ非常に優れている。

- (1) エネルギー効率
- (2) 生産性
- (3) 経済性

エネルギー効率の面から見れば、図1.1に示すように電解研磨等で数nm（ナノメートル）の微量加工を行うよりも、切削で数 μ m（マイクロメートル）～数mm（ミリメートル）

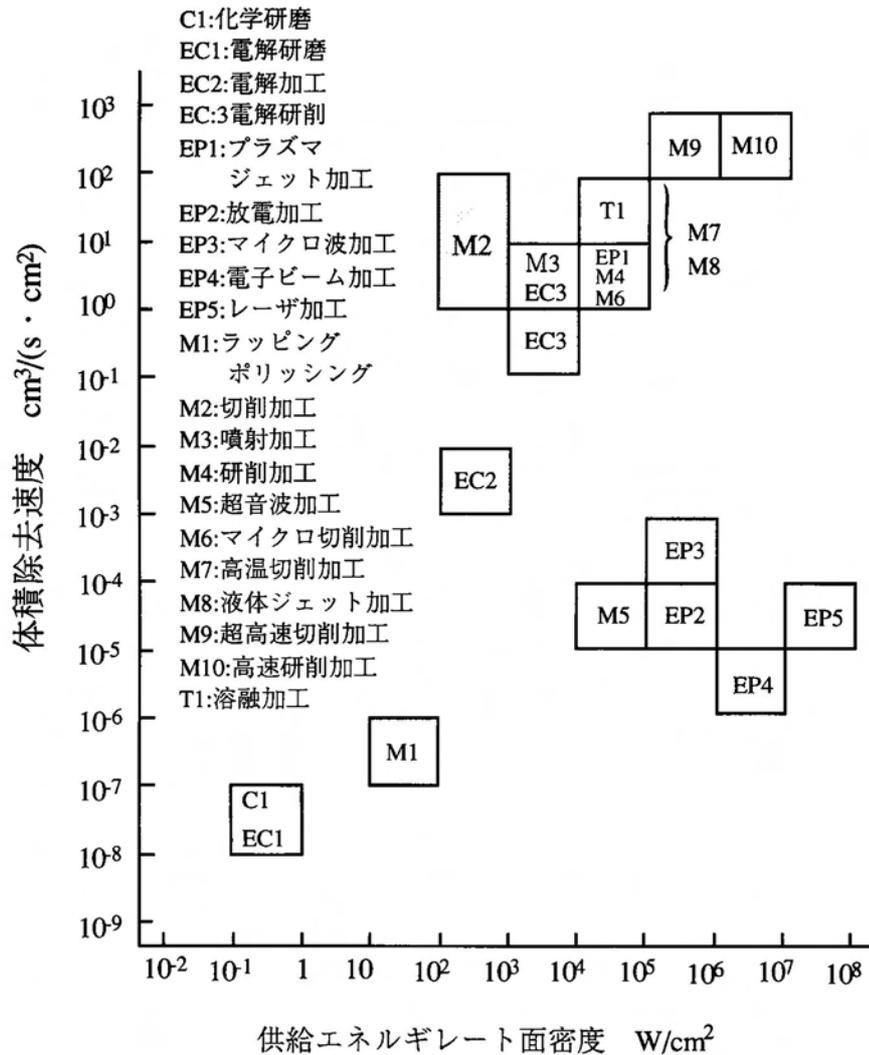


図1.1 各種除去加工のエネルギー効率からみた比較³⁾

の加工を行う方が有利である。

加工精度の面から見れば、加工誤差を補正して高精度な加工を目指すためには、加工誤差を測定する技術・加工誤差を補正する技術が必要になる。図1.2に示すように測定技術の進歩に伴い、加工精度の到達精度は大きく向上した。測定器はそれ本来が高精度な測定をおこなうことを目的に設計されており、単体で使用する事が前提になっており、加工された工作物を測定器に取り付け精度良く測定することは可能である。しかし、工作機械自体は一旦工作物を取り外してしまうと、補正加工のために再度工作物を工作機械に取り付けたときに前回と同様に取り付けることが出来ず、精度

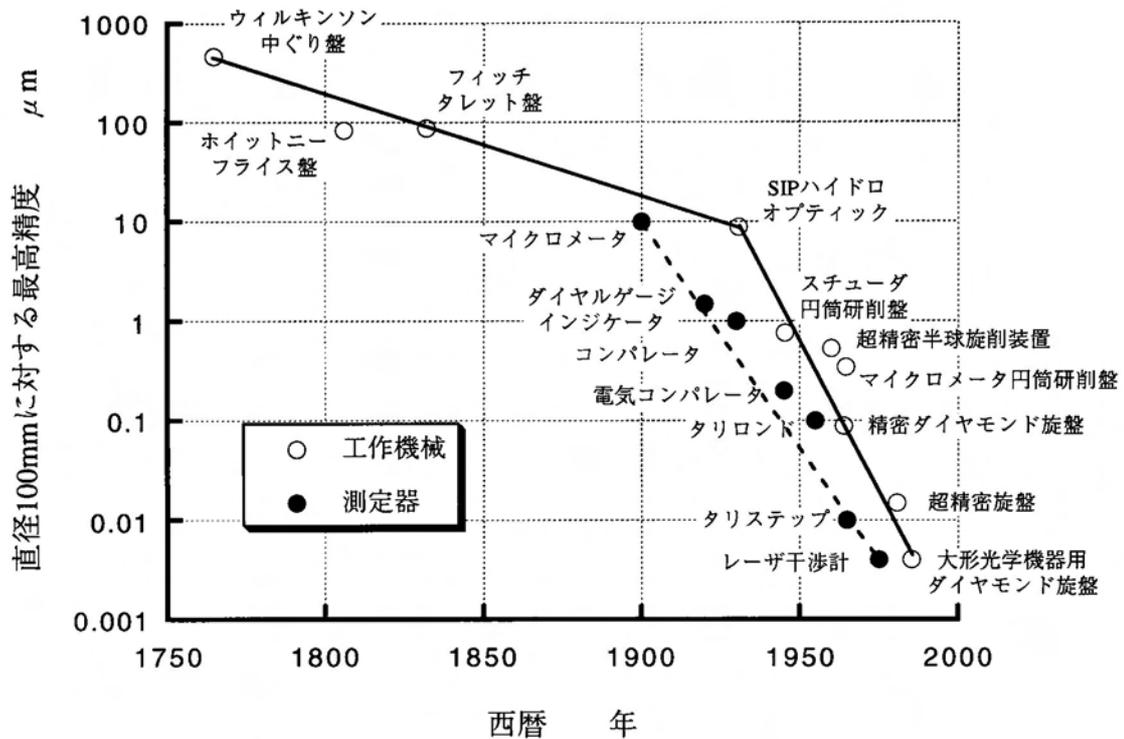


図1.2 工作機械の到達精度と測定器の推移⁴⁾

劣化を招いてしまう。また、測定に要する時間が長い場合には、その間に工作機械の熱的状況等が変わってしまうのも精度低下を招く原因の1つである。さらに、工作機械自体の精度測定となると、より大型の測定器を用意するか、小型の測定器（レーザー測長器）を使った場合には工作機械の外部に測定基準を設ける必要がある。工作機械の誤差測定には、垣野らのストレートエッジマスター法⁵⁾やJ.B.Bryanの測定法⁶⁾、超精密旋盤では河野らのインプロセスでの加工面基準制御方式⁷⁾などがある。旋削加工では、特に直径方向の精度が要求されることが多いが、これは工作機械の幾何誤差の中でも特にベッド滑り面の真直度に起因する。このような旋盤の幾何誤差測定には、複数の変位計を利用した方法^{8) 9)}が提案されており、この場合に生じる複数の変位計のゼロ点調整誤差を補正する手法として自律的決定法¹⁰⁾や反転法¹¹⁾が提案されている。しかし、これらは複数の変位計を使用するためその構造やデータ処理が複雑になる等の問題がある。さらに、工作機械の精度をそのまま補正に利用していることや、構造上誤差を測定している点と補正を行う点にずれが生じるなどの問題点が残されてい

る。

消費者ニーズの多様化や商品のライフサイクルの短縮と共に機械部品の小型化・高機能化が要求されるようになり、加工の高能率化・高精度化の要求はますます高まっている。これに応えるには高速加工や自動化技術のみでは対応が不十分である。加工された品物に対して高能率・高精度に測定を行い、測定された結果をシステムにフィードバックし、加工精度を向上させる、即ち如何にして加工物の精度を把握するかが高品位加工には必要である。そのため、誤差測定・加工・測定・補正加工を一元化された工作機械、一元化されたデータで管理することが必要である。

このような生産工程ではNC工作機械の利用は不可欠である。NC (Numerical Control: 数値制御) とは、運動制御機能とシーケンス制御機能を備えたものであり、数値と符号で構成されたプログラムによって機械 (工作機械, 搬送機, ロボット等) の移動距離・方向・速度・種類を与えて制御することである。これにより従来作業者が手動で行っていた諸操作が自動化されるばかりでなく、危険な場所での作業や熟練作業でも困難な複雑形状が高速・高精度に加工可能になった。

切削加工において高品位な製品を得るための精度確保についての現状とその問題点を要素技術別に述べる。

(1) 工具技術

一对の工具と工作物の相対位置や相対運動によって加工面が生成される旋削加工では、これらの相対関係の精度を如何に高めるかが重要なポイントとなる。1960年代に単結晶ダイヤモンドが開発され、工具ノーズ半径を $0.1 \mu\text{m}$ まで小さくすることが出来るようになった。これにより、工具と工作物の相対位置を精密に制御することが出来るばかりでなく、送りも小さくすることが出来るため表面粗さ (Ry) で $0.15 \mu\text{m}$ の精度が容易に確保出来るようになった¹²⁾。また、ダイヤモンド工具の研磨成形直後の初期切削時には、構成刃先が発生し易い。これは、ダイヤモンド工具の研磨時にすくい面の表面粗さが微小ではあるが粗くなり、切削時に被削材が溶着し易いためである。さらに、このような加工が可能な材料はアルミニウム合金 (例えば、ポリゴンミラーや磁気ディスク基板の加工) や特殊な銅合金 (例えば、高出力レーザ反射鏡の加工) に

限られており、通常の炭素鋼等は炭素とダイヤモンドの親和性の問題からも加工が困難である。

近年、切削工具の世界では、特に超硬合金の主成分である WC を TiC や TiN で置換したサーメット (cermet: ceramic+metal, セラミックと金属からなる複合材料を意味する造語) が良好な仕上げ面を得るのに利用されている¹³⁾。サーメットは超硬工具に比べ高速での耐摩耗性に優れ、鋼との反応も少ないという特徴をもつものの靱性や熱衝撃では若干劣っている。そのため仕上げ切削や、比較的負荷の少ない軽切削に適している。

(2) 形状測定技術

精密形状測定技術は、平面、球面、非球面、自由曲面、エッジ、凹凸など網羅すべき範囲は広い。測定面の大きさも多様で、微小なものから巨大なものまでである。以下その代表的なものを示す。

工作物の直径寸法を測定するのに利用されているファイバークレーティングハルトマン法¹⁴⁾は、光源点とコリメータレンズにより平行光を作り、その光束に垂直に置かれた多数のピンホールを持つ隔板 (ハルトマン板) により光ビーム群を作る。この光ビーム群が測定物に遮られ、受光部がこの信号を受信した時間を測定することで工作物の寸法を算出する (同様の原理のものを 2.2 旋盤の幾何誤差測定で使用)。しかし、口径の大きな凹面鏡を測定するとなると、そのようなコリメータレンズを得ることは困難である。

(3) 誤差評価

工作機械のもつ機械的誤差や駆動機構による誤差、加工プロセス中に生じる切削力や熱による誤差、さらに環境の影響が工作機械・工具・工作物に作用し、最終的な出力となる工作物の品質に反映される。これらの品質を評価する加工精度には一般的に寸法精度、形状精度、表面粗さがあり、いずれも理想値に対する偏差で表される。加工精度を支配する要因には以下のものが考えられる。

○工作機械の静的精度

工作機械各部の送り運動、回転運動、位置決め等の精度でこれらは案内面、軸受、送

りねじや歯車等の各要素の精度とそれらの組立精度によって決定される。工作機械の構造によっては床への据え付け時の精度や経年変化などによっても精度が低下する。このような工作機械の静的精度に起因する加工誤差は、繰り返しても毎回同じように現れる特徴がある。

○熱膨張

工作機械内部の熱源として、モータ、軸受、歯車、油圧ポンプ、油圧駆動シリンダー、バルブ等の動力損失のあるところ。また、熱は切削点で発生し、切りくず、工具、工作物に流入する。さらに、室温とその変動等がある。

○切削抵抗によるたわみ

切削抵抗の背分力による工作物のたわみや、主分力による工具のたわみ。

上記の加工誤差要因の内、工作機械内部の熱影響については、定常状態になるまで暖機運転をする等の対策がとられている。また、切削抵抗による影響も工作物の細長比を大きくするか、切込み・送りを小さくする、さらに振れ止めを利用することにより抑えることが出来るが、切込み・送りを小さくしたり振れ止めを利用すると表面粗さの悪化を招く等新たな問題も出てくる。

現在の高精度旋削加工には加工法、加工誤差測定法、誤差の評価方法、さらに補正方法などに関して数多くの問題が残されている。これらを十分に吟味した上で、より高品位な旋削加工システムを研究・開発する必要がある。

1.2 本研究の目的

前節にも述べたように旋削加工において、より高機能で高精度な製品が求められていることや消費者ニーズの多様化による多品種少量生産体制、さらには納期短縮やコストダウンの要求に応えるために、さらなる高品位化を目指す必要がある。

切削加工の品位を、中山¹⁵⁾や竹山¹⁶⁾は幾何学的品位（寸法精度、形状精度、あらさ等）と材質的品位（加工変質層、表面硬度、残留応力等）に大別して考えている。

本研究では、旋削加工の高品位を単に高精度化（形状精度や表面粗さの改善）とし

て捉えるのではなく、加工法（旋削加工）の持つ能力や工作機械（CNC旋盤）が持っている本来の性能を最大限に引き出した加工を行うことを「加工の高品位化」と定義する。これを実現するための技術課題として以下の課題について検討する。

(1) 高精度化

図1.3に示すように、加工精度を上げるために使用する(NC)工作機械の最小設定単位(NC工作機械に指定可能な最小駆動量)を小さくしても、切削現象に起因する誤差や工作機械の幾何的誤差などにより最終的に得られる製品の精度は最小設定単位を大きく上回っている。これらの誤差を旋削加工のみで補正する。表面粗さも最終的には考慮する必要があるが、研削や研磨加工では工具（砥粒）の形状、切込み深さ、送りに相当する切れ刃位置が旋削加工の場合と違い統計量であらわすことしかできない。また、微小工具では十分な切削作用が期待できず、盛り上がりが出来表面粗さの悪化を招く¹⁷⁾。このように旋削加工の持つ能力を十分に引き出すことで高品位化を目指す。

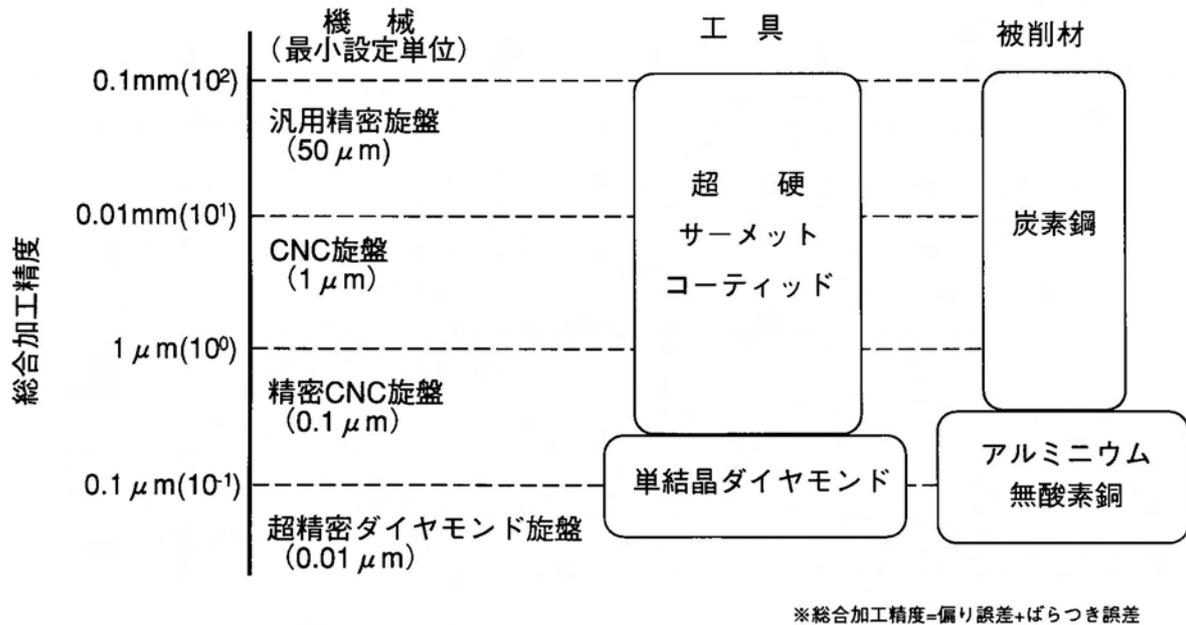


図1.3 工作機械（旋削加工）の最小設定単位と総合加工精度

(2) 高能率化

旋盤の切削作業は正味加工時間の割合が20～40%前後で¹⁸⁾、残り時間は段取り時間、操作時間や測定時間で他の加工法に比べ正味加工時間の割合が少ない（それだけ他の加工法よりも実加工時間が短い）。工作物をCNC旋盤に取り付けたオンマシン状態で、測定する事なしに荒加工・仕上げ加工・必要に応じて補正加工を実現すれば、正味加工時間の割合を大幅に増加させることが出来る。また、測定が必要な場合にもオンマシンで行うことで、さらに高能率化を目指すことが可能である。

(3) 経済性

フィードバック制御で加工誤差を補正し高品位な製品を得るためには、CNC旋盤に刃先位置を微小に制御する機構を付加したり、インプロセスでデータ処理が可能な測定装置を用意する必要がある。NC工作機械自体を改造することなく機械のもつ最小設定単位を利用した補正加工が実現できれば、既存の工作機械の有効利用につながり最終的には製品のコストダウンにつながる。

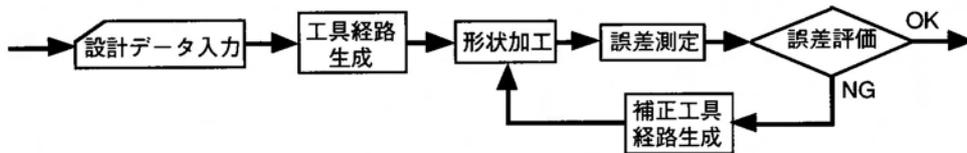
(4) 自動化

高精度なNC旋盤を十分に使いこなすには、効率の良いNC命令を生成するシステムが不可欠である。設計形状から自動的に工具経路を生成する自動プログラミングシステムや、自動的に加工誤差を測定するための自動加工誤差測定システムの開発を行う。測定された加工誤差（切削現象による誤差と工作機械の幾何誤差）データは、データベース化され、誤差補正のための加工誤差自動補正システムへと渡される。これら、加工、測定、補正の同一マシン、同一データで行うことでシステムの一元化を図り自動化を進める。

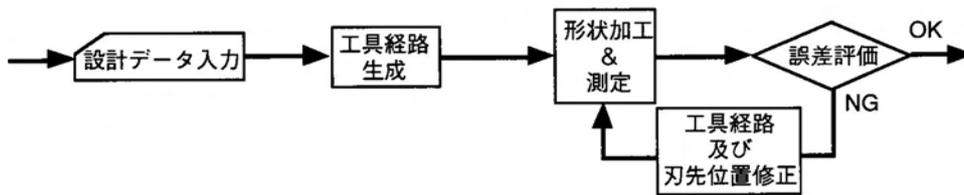
本研究では、以上の課題について加工誤差を形状精度や表面粗さの観点から捉え、旋削加工の高品位化を目的としている。その際、既存のCNC旋盤の有効利用を図るためNC工作機械を無改造で利用することを念頭におき、実験的に得られた加工誤差モデ

ルを基に旋削加工の高品位化を実現する。

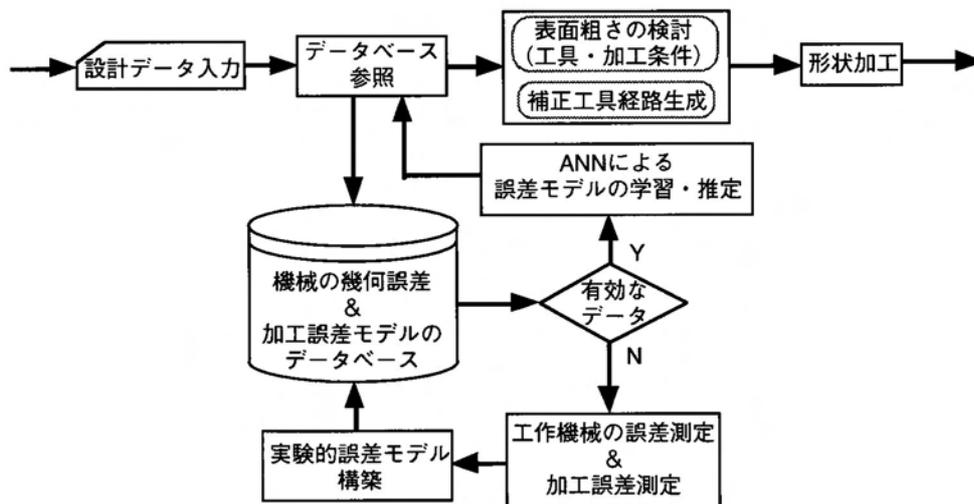
図1.4に本システムに関する基本的な構想, および従来のシステムとの違いを示す。全ての工程をオンマシン, 同一データで行うことで, 従来のシステムと異なる点は, 同一の工作機械上で, 加工から誤差測定まで工作物を取り外すことなくオンマシンで行える点である。上記のシステムに関する基本的な概念を基に, 本研究では如



(a)オフラインでの誤差補正システム



(b)フィードバックによる誤差補正システム



(c)本システム

図1.4 高品位旋削システムの概念

何に加工効率を落とさず高品位に旋削加工を行うかを念頭に置き、CNC旋盤自体の最小設定単位を使った加工誤差補正システムを構築した。このシステムを中核にして、CNC旋盤の幾何誤差を測定するシステムや自動プログラミングシステムを統合するシステム開発を目的としている。さらに、最終的な誤差補正対象として表面粗さを取り上げ、これを論じた。

1.3 本論文の構成

前述のように、旋削加工において高品位加工を実現するためには、加工誤差を補正するために用いる加工誤差モデルとその加工誤差を補正するための補正方法の開発が重要である。

本研究では、加工対象をセンターワークの外周切削に限定した上で、オンマシンによる旋削加工の精度制御システムを開発する。

本研究の内容は、以下の通りである。

- (1) オンマシンによる旋削加工誤差測定システムの開発
- (2) オンマシンによる高品位加工システムの開発
- (3) 微小旋削における表面粗さの補償
- (4) 総合旋削システムの開発

具体的な研究概要は以下の通りである。

第2章は、旋削加工時に発生する様々な誤差要因、特に寸法精度について実験結果を基に検討する。先ず切削現象によらない加工誤差としては、旋盤の幾何的誤差を測定するシステムを開発した。本方法は、旋削加工では工作物が回転しその回転中心軸は、チャック中心と心押台を結んだ直線と一致するという考えに基づいた測定法で、外部の測定基準を利用せず、オンマシンで測定が可能なシステムである。誤差測定から補正加工までを同一の工作機械で行うことにより、誤差データが一元管理できる。この測定法はオンマシンでテストバーを使用する必要が無い等の特徴がある。切削現

象による加工誤差測定としては、工具摩耗や切削抵抗による工作物・工具の変形さらに、切削熱による工具熱膨張の測定を行う。これらの測定データを基に実験的加工誤差モデルを構築する。切削現象による加工誤差のみならず工作機械の幾何誤差を別々に測定することで、予め測定された加工誤差データを他の旋盤でも有効に利用することが可能になる。

第3章は、旋削加工が本来持っている能力や既存のCNC旋盤の性能（最小設定単位）を十分に引き出すフィードフォワード方式による加工誤差補正システムを開発する。フィードフォワード方式による補正の場合、刃先位置を制御する余分な装置は必要としないが、予め補正を行うためのデータが必要である。本研究では第2章で得られた実験的誤差モデルを基に工具経路を修正するが、この加工誤差モデルは実験データを基に簡単な指数関数で表現される。データベースに存在しない条件については、人工ニューラルネットワークによる予測を試みる。

第4章は表面粗さの補償である。寸法精度は上記の加工誤差補正システムにより最小設定単位と同程度まで補償できる。この誤差は既に表面粗さの領域に達しており、さらに高品位化を目指すには表面粗さの改善が必要がある。ここでは、仕上げ加工で微小切削を行った場合に限定し加工条件が表面粗さに与える影響について検討し、その補償方法について述べる。

第5章は、総合旋削システムの開発である。本システムの開発に当たっては、最小設定単位が $1\ \mu\text{m}$ のCNC旋盤を利用することを前提にしている。さらに現場の熟練作業者の経験やノウハウを活かしたNC命令を作成するために考案したもので、市販の自動プログラミングシステムのようにコマンド形式のパートプログラムを使わない形状入力法とした。本システムには、加工用NC命令生成に加えオンマシンで加工誤差を自動的に測定システム、測定された誤差データを基に加工誤差を補正するためのNC命令を生成する機能も備えている。

第6章は、本論文の総括である。

第1章の参考文献

- 1) 新版精密工学便覧, (社) 精密工学会編, コロナ社 (1992) 2.
- 2) 第8回特定機械設備統計調査, 通商産業大臣官房調査統計部 (1994) 9.
- 3) 小林昭: レーザ研究, 開発社 (1976) 199.
- 4) 伊東誼, 森脇俊道: 工作機械工学, コロナ社 (1989) 25.
- 5) 垣野義昭, 谷口博之, 安井誠, 上杉憲一: 工作機械の直線運動誤差の測定法に関する研究, 精密機械, 48,2(1982)239.
- 6) J. B. Bryan : A Simple Method for Testing Measuring Machines and Machine Tools, Part 1 : Principle and Applications Prec. Engg., 4, 2, (April 1982).
- 7) 河野嗣男, 面田学, 岡崎祐一, 小沢則光, 三井公之: インプロセス計測加工精度補償の研究 (第1報) -加工面基準制御加工法の原理と基礎実験-, 精密工学会誌, 54, 8(1988)1463.
- 8) 戸沢幸一, 佐藤壽芳, 大堀真敬, 駒崎正洋: 工作機械の真直度と加工精度の関連に関する研究, 日本機械学会論文集 (C編) 47, 419(1981)909.
- 9) 清野慧, 奥山栄樹, 住田正臣: 平面のうねり形状の測定に関する研究 (第2報) -形状測定とデジタルフィルタ -, 精密工学会誌, 54, 3 (1988) 513.
- 10) 高偉, 清野慧, 奥山栄樹: ソフトウェアデータムによる形状の絶対測定, 精密工学会誌, 60, 4 (1994) 554.
- 11) 山口城治: 改良逐次3点法による直線運動精度の計測, 精密工学会誌, 59, 5 (1993) 773.
- 12) 超精密加工マニュアル, 応用機械工学編集部編, 大河出版 (1989) 44.
- 13) 土屋靖: 旋削用仕上工具の性能と活用法, ツールエンジニア, 38, 10 (1997) 44.
- 14) 岩井智昭, 尾西隆, 河野嗣男, 小澤則光, 竹内喜代松: ファイバークレーティングハルトマンテストによる切削金属鏡のオンマシン測定, 昭和64年度精密工学会春季大会講演論文集 (1989) 169.
- 15) 中山一雄: 機械工学大系 - 切削加工論, コロナ社 (1978) 139.

- 16) 竹山秀彦：大学講義-切削加工，丸善（1994）105.
- 17) 超精密加工マニュアル，応用機械工学編集部編，大河出版（1989）18.
- 18) 第8回特定機器設備統計調査 通商産業大臣官房調査統計部（1994）18.

第2章 オンマシンによる旋削加工誤差測定

2.1 緒言

旋削加工において製作された機械部品の加工精度は、

- 1) 寸法精度（直径，長さ，厚さなど）
- 2) 形状精度（真直度，平面度，真円度，円筒度など）
- 3) 面精度（表面粗さ，うねりなど）

に分けて考えられる。これらは、いずれも基本的には工具刃先と工作物の相対運動の精度によって決まるものである。ただし、表面粗さについては工具材料と工作物材料間の物理的、化学的作用などが複雑に絡み合うため寸法精度や形状精度とはその創成過程が異なる。

本章では、各要因が寸法精度と形状精度に与える問題点を述べ、どのように影響するかを実験的に検証し論じる。

現在、最小設定単位が数 μm ～数 nm という高精度のCNC旋盤が数多く市販されている。これらCNC旋盤は与えられた指令値により刃物台が移動し工作物が加工され、その寸法は設計値となる。ところが旋削加工に伴う発熱，切削力による外乱や機械自体に依存する様々な誤差により設計値と実際に刃物が移動し加工された工作物の最終

的な寸法が一致することは殆どない。設計値により指定された値と、最終的に加工された工作物との差が、加工誤差となる。このような精度低下を引き起こす加工誤差になんらかの対策を講じなければ、高精度の製品を得ることは出来ない。加工誤差が最終的な工作物の加工精度に及ぼす影響を個別に測定でき、そのメカニズムを解析することが出来れば個々の要因を排除することが可能になる。旋削加工中に発生する加工誤差を図2.1に示すが、実際にこれらの要因はそれぞれが複雑に絡み合っているため、個々の要因を単独で評価することは非常に困難である。

旋削加工中の誤差は、理論的にはCNC旋盤の最小設定単位を駆使すれば、加工誤差を最小設定単位と同程度まで抑えることが可能である。本論文では、先述の個々の加工誤差要因を詳細に測定しそのメカニズムを解析するのではなく、加工誤差を最終製品である工作物側から測定し、その結果を基に加工誤差を補正する手法をとる。最終形状の観察については、特に直径方向の寸法精度について行う。このように加工誤差を補正し精度を向上させることができれば、CNC旋盤の持つ高い加工能率に加えて高精度加工が同時に実現できる。

本章では、旋削加工精度の補正対象として旋盤の幾何誤差（運動誤差）と切削現象に起因する誤差について測定する。

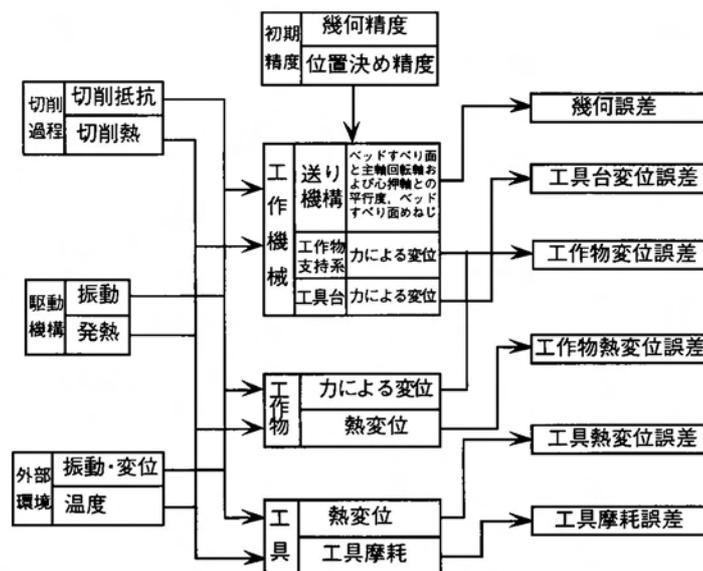


図2.1 加工誤差とその要因

2.2 旋盤の幾何誤差測定

2.2.1 測定原理

工作機械の加工性能を低下させる要因としては、幾何誤差や運動部分の自重によるたわみの直線運動に与える影響が非常に大きい。フライス盤やマシニングセンタのような直交三軸型の工作機械の幾何的誤差を測定するには、垣野らのストレートエッジマスター法¹⁾やJ. B. Bryanの測定法²⁾、超精密旋盤では河野らのインプロセスでの加工面基準制御方式³⁾等がある。しかし、工作機械の精度をそのまま補正に利用していることや、構造上誤差を測定している点と補正を行う点にずれが生じるなどの問題点がある。旋盤による旋削加工では、特に直径方向の精度が要求されることが多く、この精度に最も影響を与えるのは、旋盤のベッド滑り面の運動精度である。旋盤の幾何誤差測定には、複数の変位計を利用した方法^{4) 5)}が開発され、この場合に生じる複数の変位計のゼロ点調整誤差を補正する方法として、自律的決定法⁶⁾や反転法⁷⁾が提案されている。しかし、これらは複数の変位計を使うため、その構造やデータ処理が複雑になる等の問題がある。

本研究ではテストバー等の外部基準を使わず、簡単な装置・計算により、旋盤の運動誤差を測定する手法を採用する。この手法は、旋盤で加工される工作物は、回転軸（チャック中心と心押し台を結んだ直線）に対してZX平面上で対称であることを前提とした測定法である。測定対象の旋盤で加工された工作物の輪郭（ZX平面上）を対向する2方向から測定し、刃物台にセンサを固定し内部基準とすることでベッド滑り面の真直度・位置誤差を求めることが可能である。さらに、この測定方法は、旋盤の幾何誤差が測定できるだけでなく、旋盤の幾何誤差と切削現象による加工誤差を独立して評価することも出来る。

旋削加工の場合、最も高い寸法精度が要求されるのは直径（X軸方向）である。それ以外の平面、例えば、XY平面のピッチングを考えると、主軸・センタ間軸心とベッド滑り面のねじれ関係についても同様に測定が可能である。しかし、「主軸台と心押し台との両心の高さの差」がJIS⁸⁾で規定されている範囲内（ベッド上の振りが500mm未満の場合0.02mm以内）であれば、 $\phi 30$ 、 $\phi 60$ の工作物の直径方向（X軸）変位は、

それぞれ $0.013 \mu\text{m}$, $0.006 \mu\text{m}$ となり本研究では除外する。

図2.2に示すようにJIS⁹⁾では、測定基準（旋盤のベッド上を移動する刃物台）上に定置された測定器により測定された値を基に、最小二乗法を用いて求めた直線が代表直線である。この直線に平行で測定値の最大値と最小値を通る二直線の間隔を「真直度」と定義している。図2.3にJISB6202に定められたベッド上の振りが500mm以下の旋盤でのベッド滑り面の真直度測定法を示す。テストバーを主軸・センタ間に取り付け、刃物台（往復台）上に定置したインジケータをテストバーに当て、刃物台を移動させた時のインジケータの読みの最大差を測定値とする¹⁰⁾。図中の測定基準は、測定の基準となる直線でテストバーの測定表面になる。実際の測定ではテストバーの両端（測定開始点と最終測定点）でのインジケータの読みが一致するように予め心押し台の位置を調整するか、図2.2に示すように、測定された全ての点から最小二乗法によって計算された代表直線と測定基準を一致又は平行にする必要がある。

図2.3に示すようにテストバーの両端でのインジケータ L の読みが、一致するように予め心押し台の位置が調整された旋盤において、同一刃物台上に対向して2個のインジケータを固定する。この時、インジケータ L の第1番目の測定値を L_1 とし k 番目の測定値を L_k 、これと反対側に固定されたインジケータ R の第1番目の測定値を R_1 、 k 番目の測定値を R_k とすると、次の関係が成り立つ。

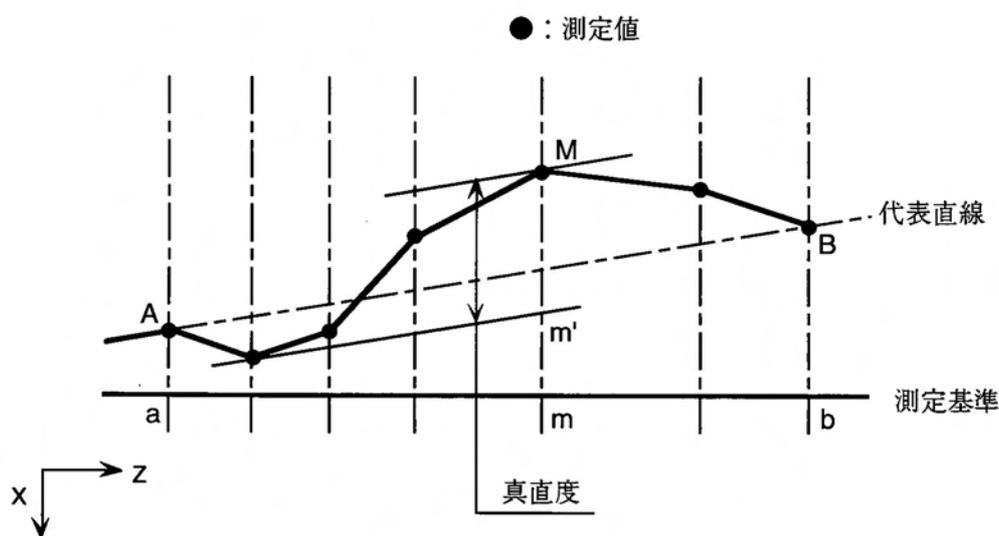


図2.2 真直度の定義

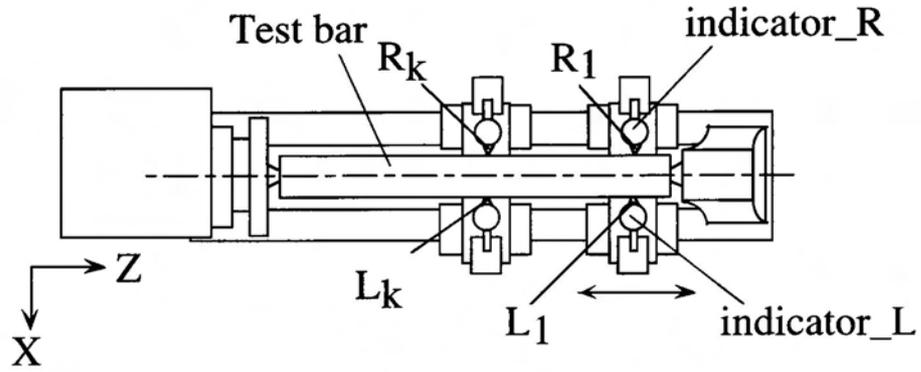


図2.3 旋盤での真直度の測定

$$L_k - L_1 = -(R_k - R_1) \dots (2.1)$$

$$\frac{L_1 + R_1}{2} = \frac{L_k + R_k}{2} \dots (2.1)'$$

式(2.1)'はテストバーの真円度，円筒度，振れがそれぞれ保証されているので¹¹⁾，その中心座標は常に両インジケータ先端の半分の位置にあることを意味する。

ここで，図2.4に示すように心押し台等を調整していない旋盤で，テストバーを測定対象の旋盤で加工された工作物に置き換える．この旋盤は，ZX平面上において代表直線と測定基準は θ だけ傾き，工作物は加工誤差により各部の直径は一定ではないとす

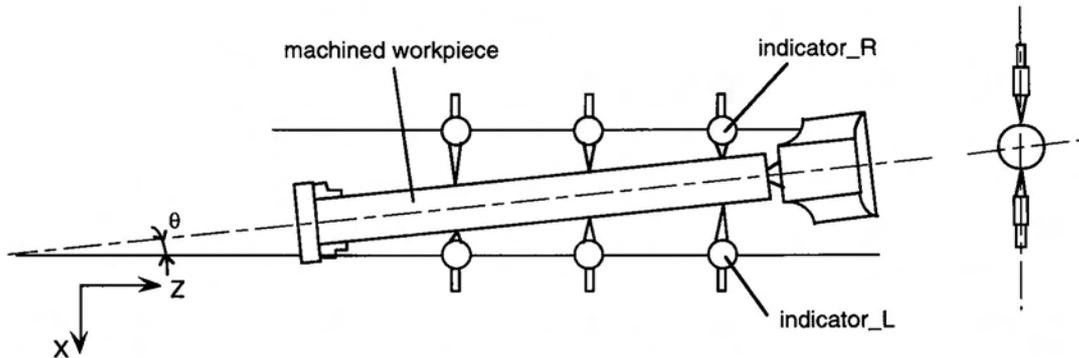


図2.4 加工物外形利用による真直度の測定

る。旋削加工において、工作物は回転軸に対して対称であると考え、測定対象である旋盤で加工された工作物はチャック中心とセンタ間に固定されているので、工作物の回転軸と代表直線が一致する。すると、両インジケータの先端の半分の位置は、工作物の中心つまり、代表直線となる。

図2.3の場合と同様に図2.4のインジケータ__Lの第1番目の測定値を L_1' 、k番目の読みを L_k' 、インジケータ__Rの読みをそれぞれ R_1' 、 R_k' とし、加工誤差を含んだ工作物の第1番目の直径を D_1 、k番目の直径を D_k とすると式(2.1)と同様に

$$L_1' + R_1' + D_1' = L_k' + R_k' + D_k' \dots (2.2)$$

となる。ここで、 $D_k - D_1$ (D_k と D_1 の差)は両インジケータの加工開始点からの加工誤差の差であり、通常旋削加工(表2.1に示す加工条件)では全体の加工誤差が10~15 μm 程度である。インジケータの刃物台に対する取り付け誤差が最大5度の場合でも、その影響は $\phi 20$ の工作物で0.14%以下つまり、0.07 μm 以下なのでこの項を無視すると、式(2.1)と同様に

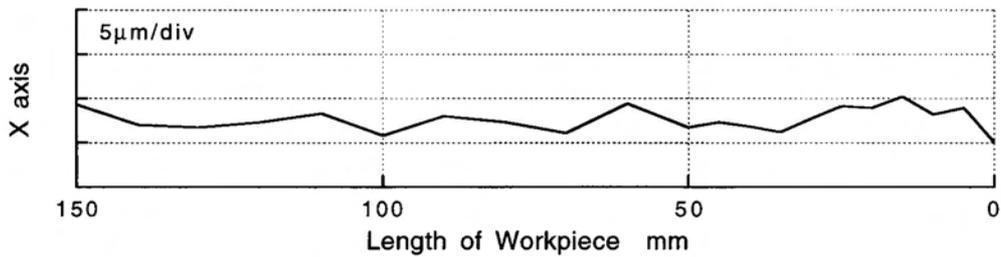
$$\frac{L_1' + R_1'}{2} = \frac{L_k' + R_k'}{2} \dots (2.2)'$$

の関係が成り立ち、式(2.2)'の中心線が代表直線となる。

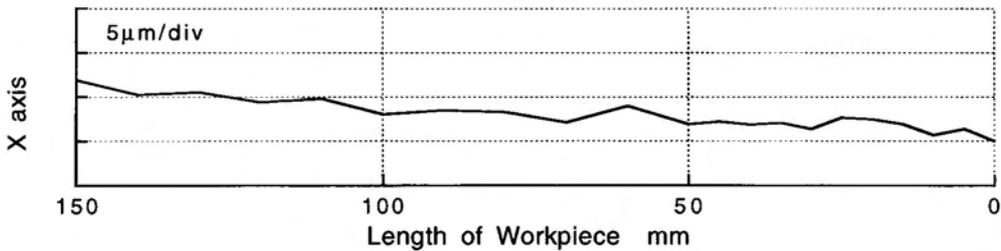
表2.1に示す実験条件で旋盤を用い加工を行った後、前述の方法により工作物の両外形を測定した。インジケータには、直動式の電気マイクロメータを使用し、測定間隔は表面粗さの影響を受けないように送りの整数倍の間隔で行った。図2.5に旋盤Aを用いたインジケータ__L, Rの測定結果と、測定データを用いて計算した旋盤のZX平面上での幾何誤差を示す。横軸は切削開始点からの距離を表し、縦軸は直径方向の値を表す。図2.5(a)の下側及び(c)の上側が工作物の実体であり、加工が進行するに従って工作物の直径が減少する傾向にある。

表2.1 実験条件

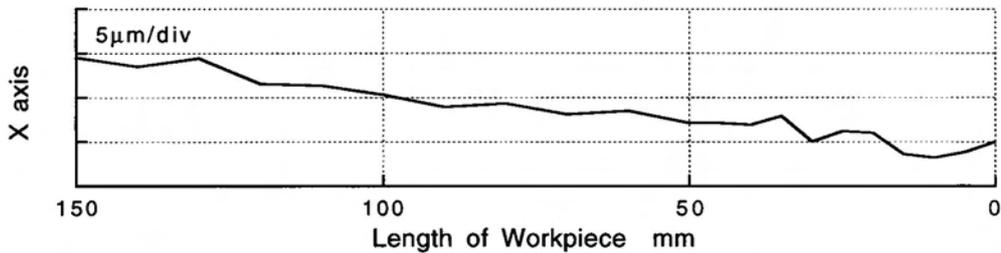
工作物	S35C	
工具	Cermet, (-6,-5,6,5,15,93,0.8)	
切削速度	200m/min	
切り込み	0.2mm,0.5mm	
送り	0.2mm/rev	
工作機械	A	汎用旋盤 (1969年製) Max dia:350mm, Max length:750mm
	B	汎用旋盤(1978年製) Max dia:400mm, Max length:850mm
	C	CNC旋盤 (1985年製) Max dia:350mm, Max:length 370mm
測定器	形式	直動式電気マイクロメータ
	測定範囲	± 3.0mm
	出力電圧	± 2.0V



(a)インジケータ_Rの読み



(b)旋盤の真直度



(c)インジケータ_Lの読み

図2.5 インジケータの読みと旋盤の真直度 (旋盤Aの場合)

測定値から最小二乗法を用い測定基準と代表直線との傾き θ を求めると、-6.8秒となり、この結果から真直度を計算すると $2.5 \mu\text{m}$ となる。前述の JIS では、ベッド上の振りが 500mm 以下の普通旋盤において、その許容値が $10 \mu\text{m}$ 以下と規定しており、旋盤は規格を満たしている。

また、本測定法が加工条件の影響を受けないことを確認するために、旋盤 B では加工条件を変えて測定した。図 2.6、図 2.7 に切り込みを $0.2, 0.5\text{mm}$ とし、各インジケータの測定値とそれから計算した真直度を示す。測定は旋削加工後、工作物の回転が停止した時点で1回目の測定を行い、その後、工作物を 90 度回転させ2回目の測定を行った。グラフには、それぞれ2回測定したものの平均値を示している。図 2.6(c)、図 2.7(c)を比較すると、切り込みの大きい図 2.7(c)の加工誤差が大きく現れているが、加工条

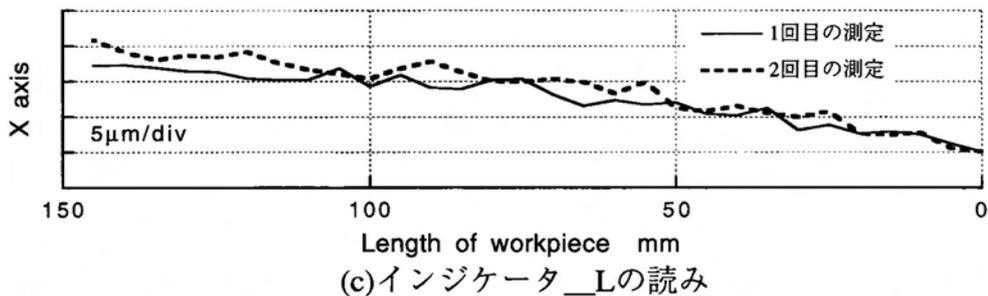
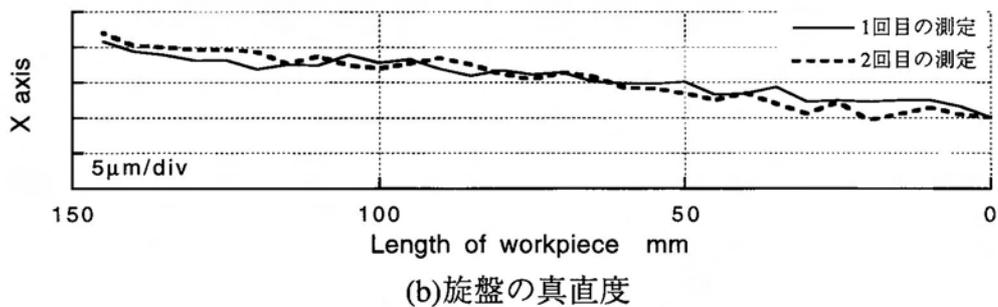
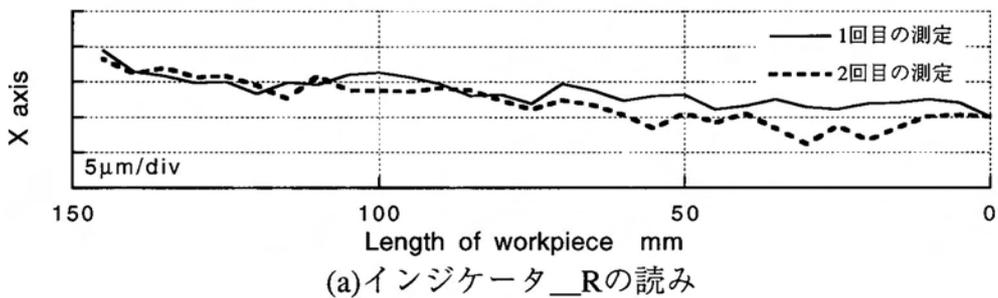


図2.6 旋盤の真直度測定結果（旋盤B，切り込み 0.2mm の場合）

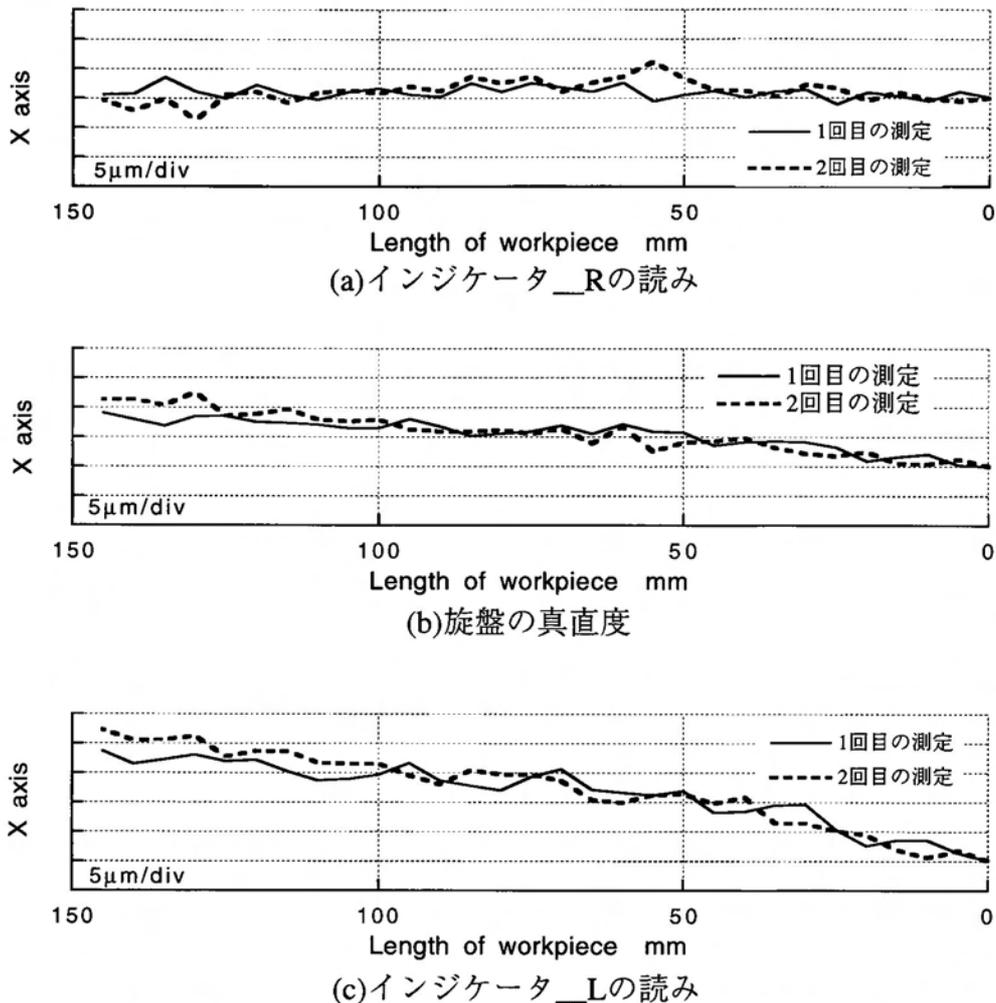


図2.7 旋盤の真直度測定結果（旋盤B，切り込み0.5mmの場合）

表2.2 測定結果

		傾き θ (sec)	真直度(μ m)
切り込み =0.2mm	1回目	-12.2	2.5
	2回目	-16.3	2.7
切り込み =0.5mm	1回目	-10.7	4.0
	2回目	-15.7	3.5

件や測定場所を変えても測定値はほぼ同じ値を示していることが分かる。これらの結果を基に旋盤Bの θ と真直度を計算したものを表2.2に示す。計算結果には多少のばらつきがあるが、接触式センサーのため、工作物を回転させることが出来ず、主軸・心

押し台のベアリングの精度が影響したものと思われる。また、測定者が送りハンドルを操作するため、2回の測定位置を正確に一致させることが出来ないこともあげられる。

2.2.2 レーザ寸法測定器による測定

前述の実験により、工作物を刃物台側と刃物台の反対側から測定し、工作物の輪郭を計算することで、旋盤の測定基準と真直度を測定できることを確認した。しかし、実際には2つのインジケータを測定毎に工作物中心軸上の測定基準に対して直角に固定したり、測定開始点に正確に再現性良く設定するのは困難である。これは、代表直線と測定基準はZX平面のみに傾いているのではなく、XY平面を含んだ三次元空間上で傾いているためである。そこで、本研究で補正対象にしているZX平面上で工作物の輪郭を正確に把握するために、レーザ寸法測定器を用いた測定を行った。

図2.8に示すように、レーザ寸法測定器の測定原理は、半導体レーザから発射されたレーザ光線を8面ポリゴンミラー及び反射ミラーで反射した後、コリメータレンズ(F θ

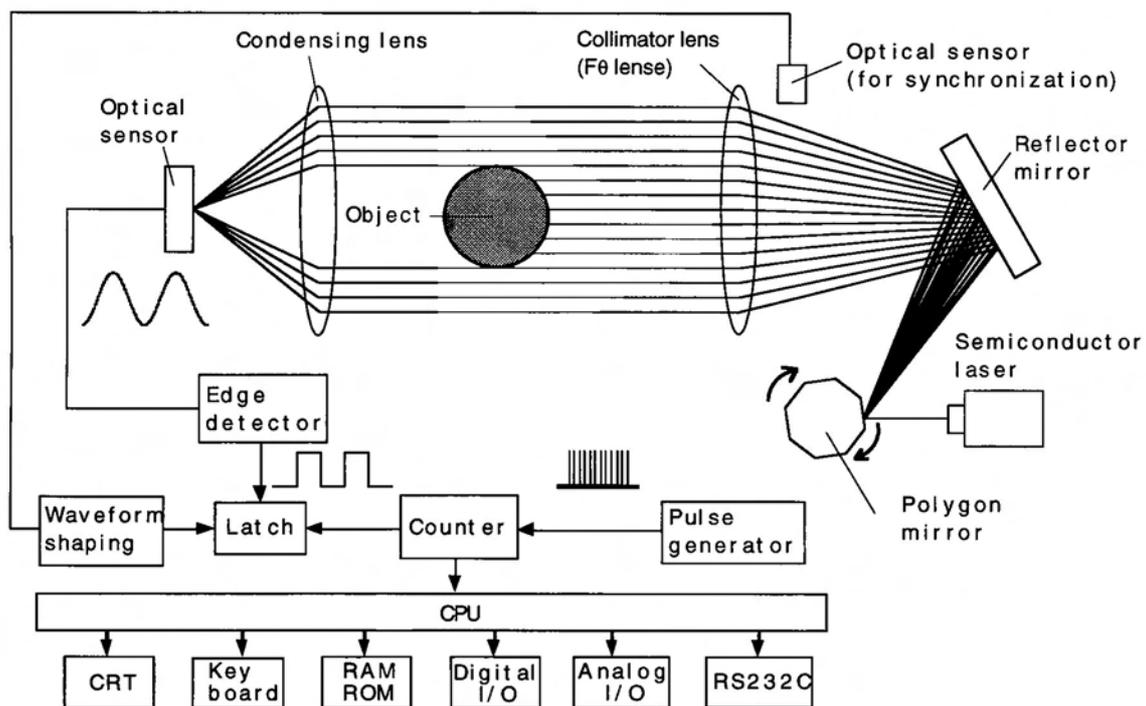


図2.8 レーザ寸法測定器動作原理図

表2.3 レーザ寸法測定器の仕様

測定範囲	0.8～60mm
最小測定物幅	0.8mm
投受光間距離	200mm±50mm
光源	赤色半導体レーザー (670nm) 最大0.5mWクラス2連続波
測定精度	±3 μ m
繰り返し精度	±0.5 μ m以下
表示分解能	0.1 μ m
レーザー走査回数	400回/秒
レーザー走査速度	126m/min

レンズ)により平行光線に変換する。測定物を走査したレーザー光線は、受光レンズで集光された後、光の明暗に応じた電気信号に変換され、この信号に明暗のエッジが生じている時間の長さを測定することにより対象物の寸法を測定する¹²⁾。表2.3にレーザー寸法測定器の仕様を示す。レーザー測定器の受光部に写る像は、測定対象物の投影面であり、接触式の電気マイクロメータなどのインジケータに比べ測定物断面の直径を正確に測定することが可能である。

図2.9に示すように、レーザー寸法測定器による工作物輪郭測定法では、測定器を旋盤の刃物台に固定する。この装置により測定される Edge1, Edge2 は、Edge0 (刃物台: 0点)を基準にした相対値として出力される。加工された工作物のk番目のEdge1, Edge2の座標をそれぞれ $X1_k$, $X2_k$ とし直径を D_k とすると、

$$X2_k = X1_k + D_k \dots (2.3)$$

$$\frac{X2_k - X1_k}{2} = \frac{D_k}{2} \dots (2.3)'$$

が成り立つ。加工された工作物の中心座標は代表直線となるので、測定された $X1_k$, $X2_k$

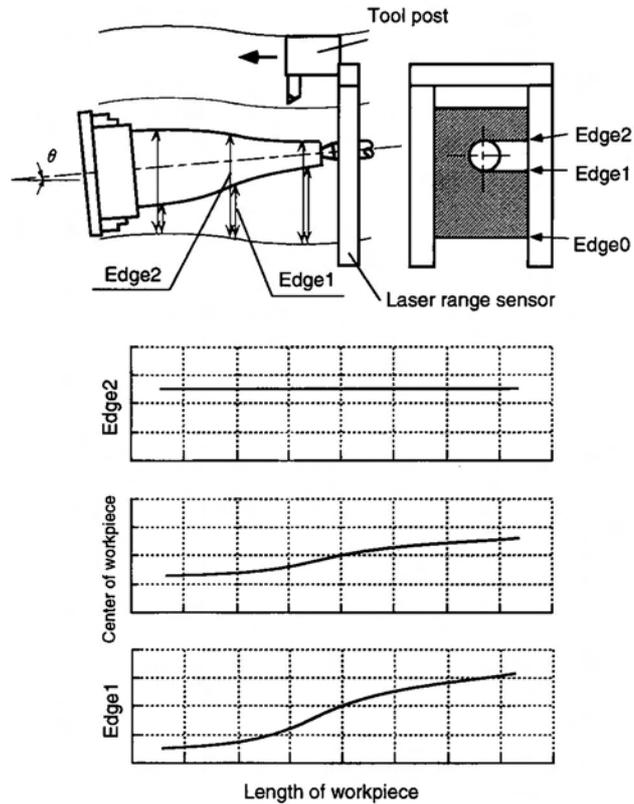


図2.9 レーザ寸法測定器による測定

の平均値が代表直線となる。

この測定法は、前述の2つの電気マイクロメータを使った測定法に比べ次のような特徴がある。

(1) レーザ測定器のレーザ発信部と受信部を直線上に一度設定しておけば、測定器ごと取り外しが可能なため、前述の測定器の取り付け誤差 α を最小限に出来、測定基準に対して直線上に配置することができる。

(2) 球状の先端を持つ接触式の測定子では、工作物の長手方向の測定開始点にこれを正確に持って行くことは困難である。非接触測定 of レーザー測定器では測定対象物の手前から測定を開始することで測定開始点のエッジ検出が容易である。

(3) 工作物を回転させて測定することができるので、1ヶ所の測定値の平均を取ることで表面粗さの影響を受けない。

(4) 加工物の直径を絶対値として測定できる。

レーザ寸法測定器を使った測定では、自動測定¹³⁾ (第5章で説明) を行うために旋

盤C（CNC旋盤）を使用する。旋削加工後，工作物をチャックに固定したまま工具を測定器に交換し加工状態と同じ回転数（1100rpm）で外形測定を行った。図2.10に測定結果を示すが，図中の縦軸はEdge0を基準としたときの値である。普通旋盤の場合と同様に加工するに従って工作物径が減少する傾向を示している。また，図中には，代表直線と測定基準から刃物台を基準としたときの工作物中心の傾きを最小二乗法で求め，代表直線と測定基準を一致させたものも細線で示した。旋盤の真直度は，この細線の最大値と最小値の差になる。

インジケータを用いた普通旋盤での実験と同様，この測定法が加工条件の影響を受けないことを確認するために表2.4の加工条件で同様の測定を行ったものを図2.11に

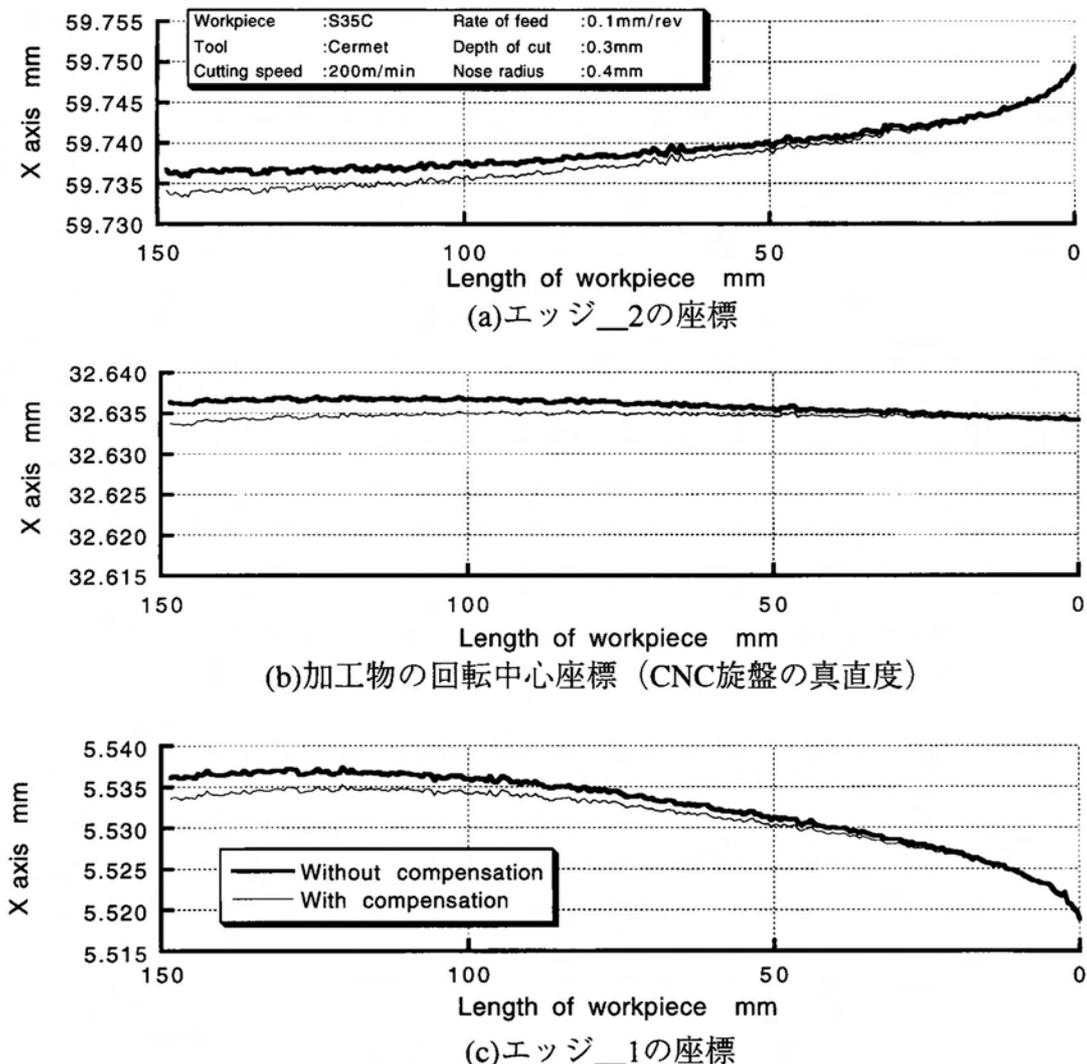


図2.10 レーザ寸法測定器による旋盤の幾何誤差測定

示す。加工中に切りくずの影響を受けないように、毎測定後に測定器は取り外さなければならないため工作物の中心座標は測定開始からの相対値とした。図から分かるように、各測定値の差は $2\mu\text{m}$ 以内であり、加工条件が変化しても工作物中心の座標値はほぼ変化していないことが確認できる。表2.5にはこの測定結果より旋盤Cの誤差を計算したものを示すが、真直度の測定誤差は $\pm 1\mu\text{m}$ である。これは、最小設定単位が $1\mu\text{m}$ のCNC旋盤で補正に必要な加工誤差モデルと同程度であり、オンマシンでの本測定法の有効性が確認できる。

表2.4 加工条件

工作物	S35C		
工具	Cermet, (-6,-5,6,5,15,93,0.4)		
切削速度	200m/min		
実験番号	1	切削送り	0.1mm/rev
		切り込み	0.3mm
	2	切削送り	0.1mm/rev
		切り込み	0.5mm
	3	切削送り	0.2mm/rev
		切り込み	0.1mm
	4	切削送り	0.2mm/rev
		切り込み	0.5mm

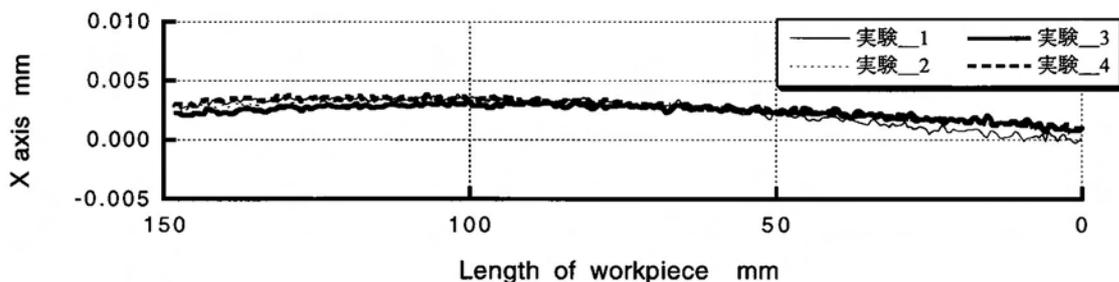


図2.11 CNC旋盤の幾何誤差

表2.5 実験結果

	$\theta(\text{sec})$	真直度(μm)
実験_1	-3.6	1.84
実験_2	-4.9	2.44
実験_3	-3.2	2.00
実験_4	-1.9	1.50

2.3 工具摩耗の影響

切削工具は今世紀初頭以来めざましい進歩をとげ、特に1970年以降はCBN工具、焼結ダイヤモンド工具、各種コーティッド工具、窒化珪素系セラミックス工具など多くの新材種工具が開発された。これにより従来研削加工に頼っていた難削材の加工も比較的容易に行えるようになってきた。しかし、それでも切削によって工具に機械的な摩耗が発生する。摩耗には、

- (a) 工作物中に含まれる介在物、析出物、補強繊維などが一種の砥粒としてはたつき、摩耗量が切削距離に比例するアブレッシブ摩耗。
- (b) 切削熱による酸化物や構成刃先の脱落に起因する摩耗。
- (c) 切込み開始時、被削材の偏心、鋳物巣などによる衝撃や振動に起因する摩耗。
- (d) 異種金属である工作物と工具の間で発生する起電力に起因する摩耗。

などがある¹⁴⁾。

切削に伴う工具摩耗は、寸法精度を低下させる要因の1つであり加工精度を向上させるためには無視することのできない現象である。工具摩耗は、工具損耗の中の1つの現象であるが、工具損傷が発生すると切削加工自体が不可能であることや、連続切削である旋削加工、特に仕上げ加工では断続切削に比べて損傷が発生しにくい。さらに工具損傷は予測自体が難しいことを考慮して、今回は工具損傷については考えず、工作物の寸法精度に最も影響を与える逃げ面摩耗について取り上げる。逃げ面は仕上

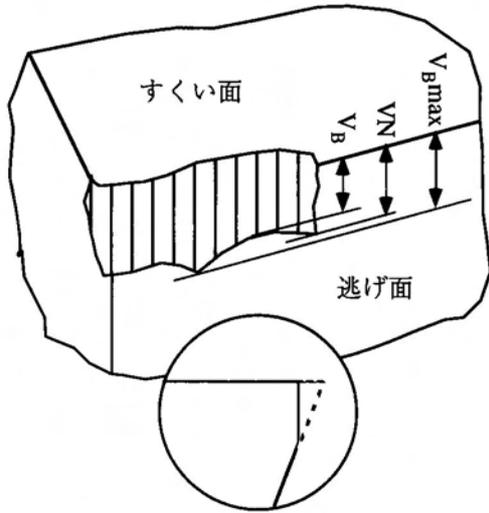


図2.12 逃げ面摩耗

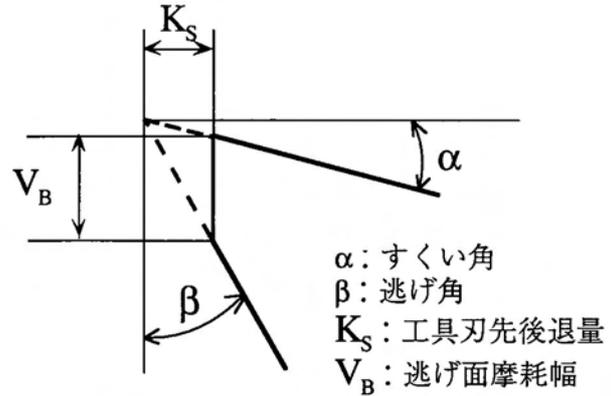


図2.13 工具刃先後退量

げ面と接触しないように逃げ角をつけているものであるが、実際には、切れ刃のごく近傍は切削面と弾性的に接触している。また、通常刃先には必ず多少の丸みやカケがあり、ここには著しい負の逃げ面の部分ができ、仕上げ面と激しく接する。一旦逃げ面が摩耗すると、この面はすくい面と同程度の高い摩擦力が働き、摩耗が進行してゆく。精密切削加工では、逃げ面摩耗幅 (V_B) を測定しある一定の損傷状態に達するまでの時間を工具寿命として工具管理を行っている。精密軽切削では0.2mmを工具寿命としている¹⁵⁾。図2.12に示す逃げ面摩耗幅の測定は、工具刃先摩耗量をCCDマイクロスコープと工具顕微鏡を用いて、一定距離切削する毎に測定した。工具刃先後退量 (K_s) は、図2.13に示すように逃げ面摩耗幅を測定すれば、

$$K_s = \frac{V_B}{\cot \beta - \tan \alpha} \dots (2.4)$$

のように計算できる。ここで、 β は逃げ角である。

一般的に逃げ面摩耗幅は、急速に増加する”初期摩耗”，ついで比較的ゆるやかに定常的に増加する”定常摩耗”の期間、摩耗幅がある程度をこえると加速度的に増加し

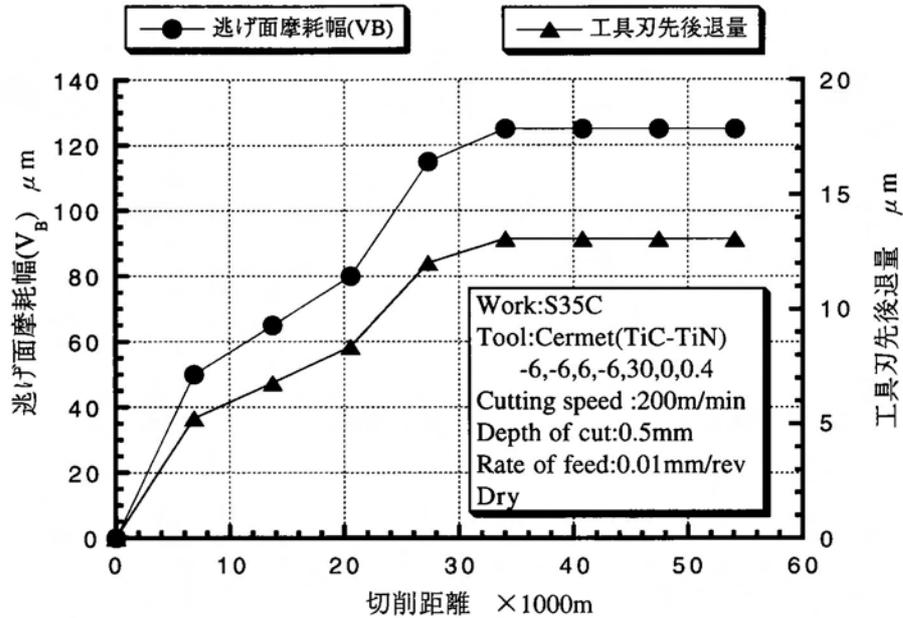
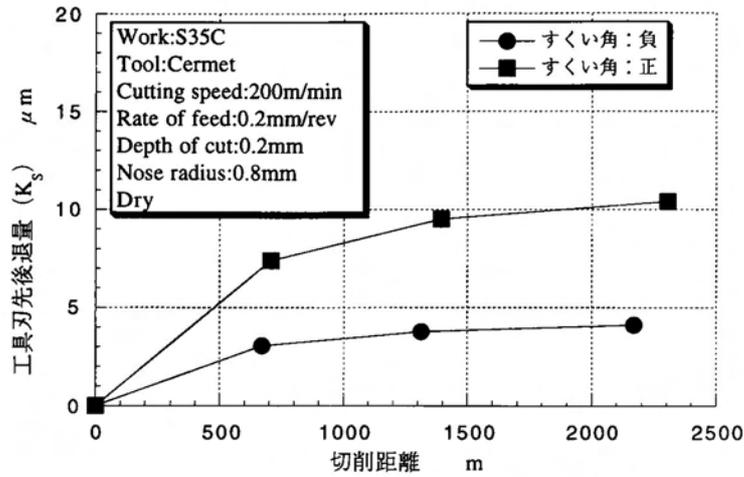


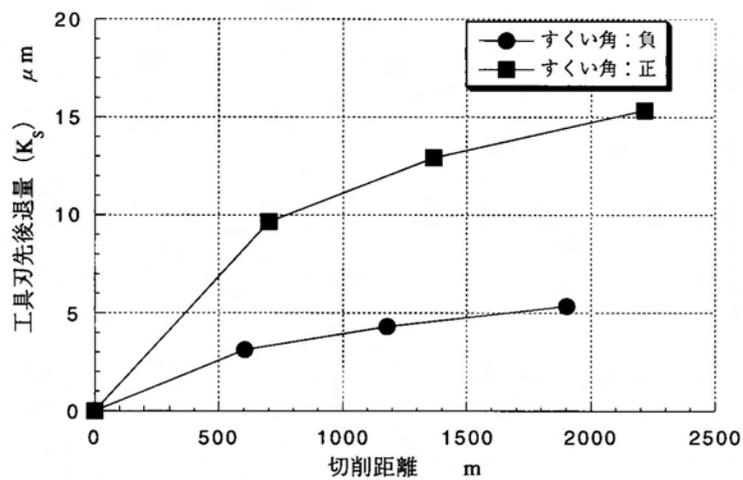
図2.14 逃げ面摩耗幅と工具刃先後退量

てゆく”加速摩耗”があり、その後使用不能になる傾向を示すと言われている¹⁶⁾。図2.14に、旋削加工での逃げ面摩耗幅を測定したものを示す。図中には、式(2.4)で計算した工具刃先先端の切り込み方向(x軸方向)の後退量を計算した結果も同時に示す。図では、30000mまでが初期摩耗の状態でありそれ以降が定常摩耗状態であり、切削距離が50000mを過ぎても加速摩耗の状態には達していない。この実験では、図中の加工条件に示すように、負のすくい角(ネガティブ)のスローアウェイチップを使用した。工具形状の違いが逃げ面摩耗に及ぼす影響を見るために正のすくい角(ポジティブ)での実験も併せて行った。図2.15(a),(b)に同一加工条件で負のすくい角(-6,-6,6,-6,30,0,0.4)、正のすくい角(6,-6,6,-6,30,0,0.4)での切削実験を行い逃げ面摩耗幅を測定したものを示す。同じ逃げ面摩耗幅ならば、切り込み方向に垂直な方向である工具の厚みの大きい負のすくい角の工具の方が、厚みの薄い正のすくい角の工具よりも摩耗進行が遅いことがわかる。また、切り込みの違いでは、切り込みの大きい方が摩耗の進行が大きいことがわかる。

一般のスローアウェイチップでは、 $\tan\alpha$ は $\cot\beta$ に比べて小さく、逃げ角 β は $5\sim 7^\circ$ であるので、刃先位置後退量 K_s は逃げ面摩耗幅 V_B の10%程度になる。



(a) a=0.2mm, f=0.2mm/revの場合



(b) a=0.5mm, f=0.2mm/revの場合

図2.15 逃げ面摩耗による工具刃先後退量

2.4 切削抵抗の影響

2.4.1 切削抵抗

旋削加工（切削加工）は工作物内部に高い応力を発生させ破壊・分離を起こさせる加工法であるので，工作物や工具に力が加わることは避けられない．この力すなわち切削抵抗は，所要動力，工作物の寸法および形状精度，仕上げ面あらし，加工変質層，工具寿命など被削性の全ての項目に直接，間接的に影響を与える．図2.16に旋削加工での切削抵抗の方向を示すが，各切削力は以下のような特徴を持つ¹⁷⁾．

(a)主分力 (F_v)：旋盤の主軸に加わるトルク (F_v×工作物半径)，主軸の駆動動力

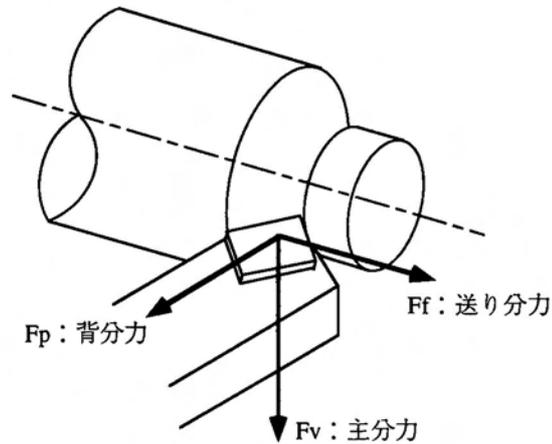


図2.16 旋削加工での切削抵抗

($F_v \times$ 切削速度), 切削点で発生する熱等はこれに比例する. この熱が工具, 工作物および工作機械の温度上昇を招き, 熱膨張による寸法精度低下や工具摩耗の促進による工具寿命の短縮につながる.

(b)送り分力 (F_f): 主軸に加わるスラスト力で, 送りねじなどの送り機構に加わる力や送り動力等は, 送り分力に比例する. しかし, 実際には往復台とベッドとの間の摩擦力が大きいため, 切削による送り分力と分けて考える必要がある.

(c)背分力 (F_p): 工作物や工具に半径方向の変形を起こさせる力で, これらの剛性が低い場合には工作物の直径誤差の原因になる. また, 変動を起こすと表面粗さの低下を招く.

以上のことから, 工作物の直径方向に影響を与える項目として,

①背分力による工作物のたわみ

②主分力による工具のたわみ

を実測した切削抵抗から計算する.

2.4.2 工作物のたわみ

切削抵抗の背分力を測定しその値を基に工作物のたわみを計算する. 工作物は, 一方をチャックで, 他方をセンターで把持する. チャック側は生爪などを使うことで容易に把持力を高めることが出来るが, センター側は工作物のセンタ穴加工の際に, セ

ンタ研削を行わなければチャック側ほど把持力を上げることは出来ない。そこで今回は、工作物の把持されている状態を不静定ばりとして取り扱う¹⁸⁾。図2.17は旋盤Bを用い図中に示す仕上げの加工条件で切削実験を行った結果を示す。

この実測値を基に工作物のたわみを計算する。ここでは、図2.18に示すように、旋盤に固定された工作物を不静定ばりとして考える。切削開始（センター側）からXの場所に背分力がかかるものとして、その点でのたわみ δ を計算するが、 $X=l_1$ の場所で δ は最大値 δ_{\max} をとるので、その計算式は、

$$\delta_{\max} = \frac{F_p l_1^2 l_2^3 (4l_1 + 3l_2)}{12EI^3} \dots (2.5)$$

となる。今回の計算では、以下の数値を用いる。

E：縦弾性係数 = $2.05 \times 10^5 \text{N}$ ($2.1 \times 10^4 \text{kgf/mm}^2$)

I：断面二次モーメント = $\pi \times d^4 / 64 \text{mm}^4$

d：工作物の直径 = 30, 60mm

$l(l_1+l_2)$ ：工作物の長さ = 200mm

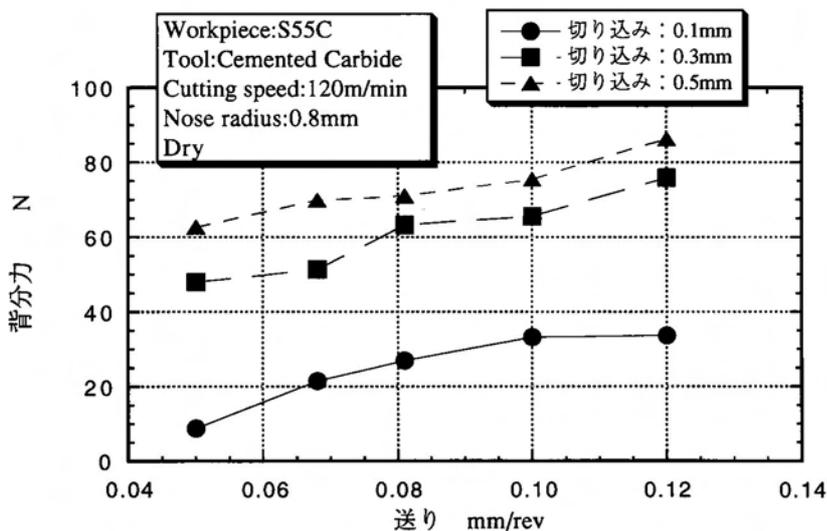


図2.17 背分力測定結果

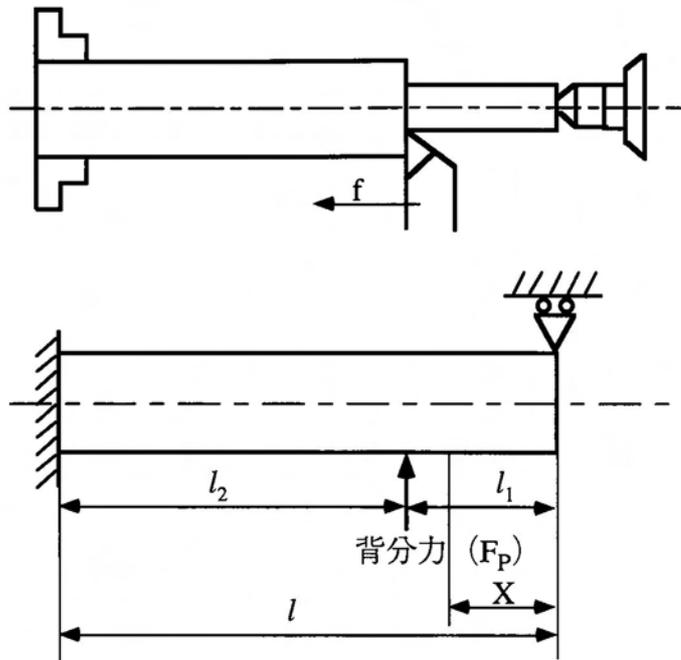


図2.18 工作物の曲げモデル

F_p ：背分力 = 各切り込みでの実験値の最大値

以上の条件より，切削開始点から X の場所を切削している時の工作物の最大たわみを計算したものを図2.19に示す．図から明らかなように，切り込み 0.5mm の場合 $\phi 60$ の工作物では $0.05\ \mu\text{m}$ ， $\phi 30$ の工作物でも $0.84\ \mu\text{m}$ となる．また，本研究では，最小設定単位が $1\ \mu\text{m}$ のCNC旋盤に限定した高精度加工システムの開発を目的としているので，補正加工は最終仕上げ工程に適応される．そのため，切削抵抗による工作物のたわみについては，考慮する必要がないと考える．

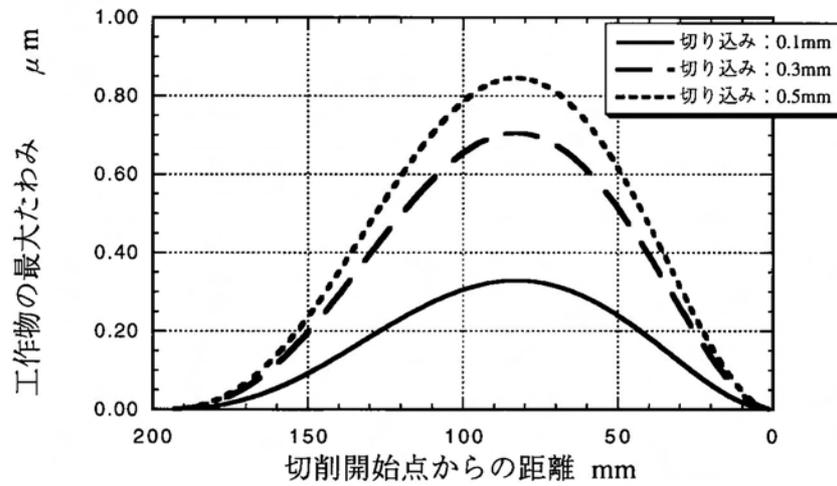
2.4.3 工具のたわみ

切削抵抗の主分力は，工具の垂直方向に働き，たわみを引き起こす．この切削抵抗によって図2.20に示すように切り込み方向の刃先位置が指定された位置と違ってくるため，最終的に工作物直径方向に寸法誤差を引き起こす．図2.21に切削距離（切削本数）による切削3分力を示す．図中にはネガティブチップとポジティブチップの場合を示すが，両者の差は殆ど識別できない．また，切削が進行しても各切削分力の値は変化していない．この実験データを用いて図2.20中の δa を計算する．計算には自由端

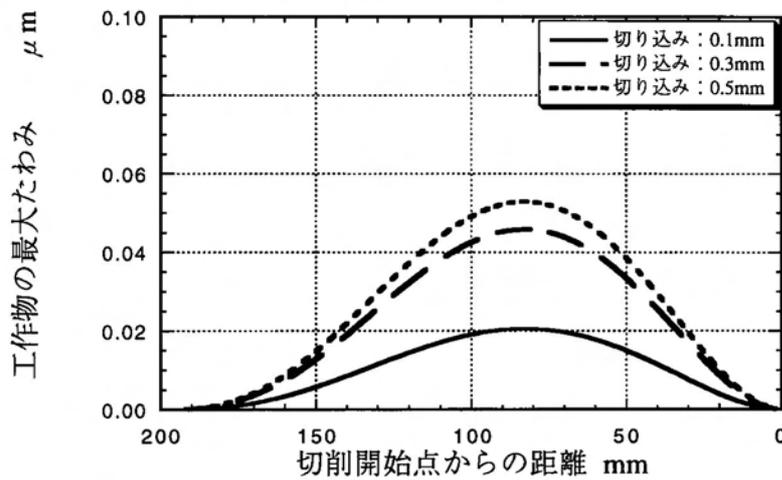
に集中荷重 P が作用する片持ちはりと考えると，工具先端でのたわみ δ_a と δ_x は，次のようになる。

$$\delta_a = \frac{F_V l^3}{3EI} \dots (2.6)$$

$$\delta_x = l - \sqrt{l^2 - \delta_a^2} \dots (2.7)$$



(a) 工作物直径30mmの場合



(b) 工作物直径60mmの場合

図2.19 背分力による工作物の最大たわみ

今回の計算では、以下の数値を用いる。

E：縦弾性係数 = $2.05 \times 10^5 \text{N}$ ($2.1 \times 10^4 \text{kgf/mm}^2$)

I：断面二次モーメント = $a^4/12 \text{mm}^4$

a：バイトホルダの一辺 = 19, 25mm

F_v ：主分力

l：刃物台からの工具の突き出し量 = 45mm

式(2.6)の計算結果より、汎用旋盤で一般的に使用される□19 (19×19) のバイトホルダで $\delta a = 3.6 \mu\text{m}$ 、CNC旋盤や比較的大型の汎用旋盤で使用される□25 (25×25) のバイトホルダで $\delta a = 1.2 \mu\text{m}$ となる。この値を基に図 2.20 に示す δx を式(2.7)を用いて計算すると、それぞれ $0.15 \times 10^{-3} \mu\text{m}$ 、 $0.02 \times 10^{-3} \mu\text{m}$ となる。

また、図 2.21 に送り分力についての工具のたわみを示すが、送り分力は主分力の半分以下となる。

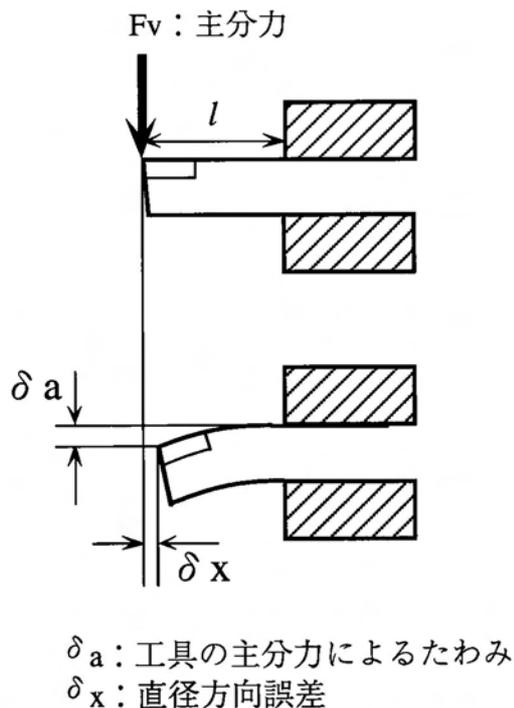


図2.20 工具のたわみによる切り込み方向誤差

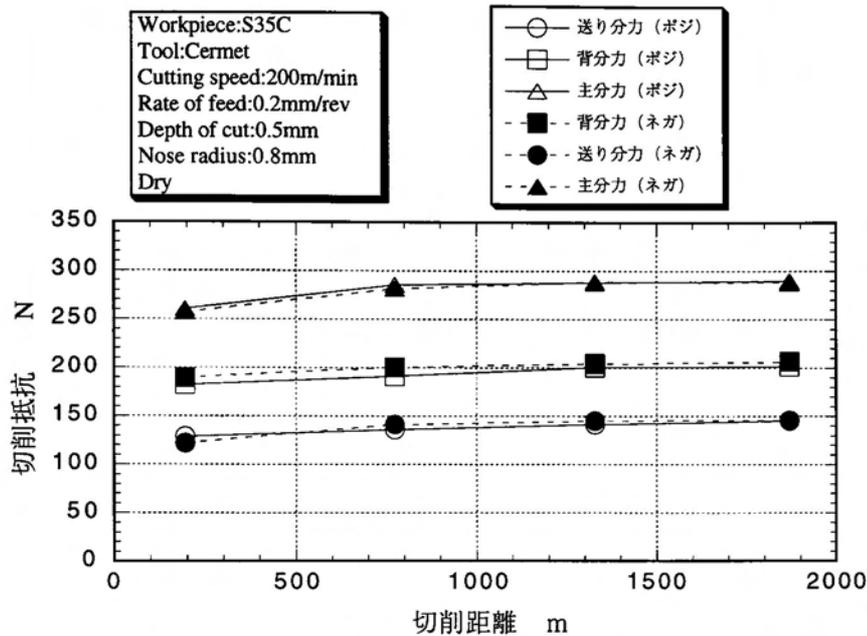


図2.21 切削抵抗3分力

2.5 工具熱膨張の影響

2.5.1 切削熱

旋削加工に限らず，金属切削加工では加工中に工具の温度が上昇する．これは，切削中に発生する切削熱のためである．この切削熱は切削現象において大きな問題であり，工具寿命などに大きな影響を与える．金属切削の場合に行われる仕事は，以下の通りである¹⁹⁾．

(a)剪断面における剪断仕事．

(b)工具すくい面での切りくずとの摩擦仕事．

さらに，逃げ面が摩耗しているときには，

(c)工具逃げ面と工作物仕上げ面との摩擦仕事．

が加わる．

一番大きな仕事は，(a)の切りくずを剪断変形させるための仕事である．これは，大部分が熱にかわりそのほとんどは切りくずとして排出され，ごく一部が工作物の内部エネルギーとして蓄えられる．(b)の工具すくい面上の切りくずとの摩擦仕事も大部分が熱

になり、残りは工具や工作物の変形になる。Schmidt, A. O.らのカロリメータ法による実験²⁰⁾ や千々岩らの研究²¹⁾では、80%近くが切りくずに伝わり、工具および工作物には約10%の熱が伝わるとされている。

2.5.2 工具熱膨張の測定方法

切削時に発生する熱膨張は最終製品の寸法精度を低下させる。単純な形で全体が一樣に膨張を引き起こすならば工具-加工物熱電対法²²⁾ や加工物に熱電対を埋め込んで測定した切削温度²³⁾ を基に工具の熱膨張を計算できる。しかし、実際の加工では不均一な熱膨張が起こるため、単純に工具の熱膨張を計算することは出来ない。

長手方向に切削した後に、工作物の直径を測定したのでは、旋盤の幾何誤差や工具摩耗等の工具熱膨張以外の加工誤差も同時に測定されてしまう。本研究では、切削中に工具熱膨張を工具側から実時間で測定する実験を行う。通常の丸材を切削するときには、工具の切り込み方向（X軸方向）には工作物があるため直接測定することは困難である。そこで、切削加工中の切込み方向の工具熱膨張を直接測定するために工作物をパイプ状のものとした。パイプ状工作物の肉厚分を切込み量と設定し、長手切削

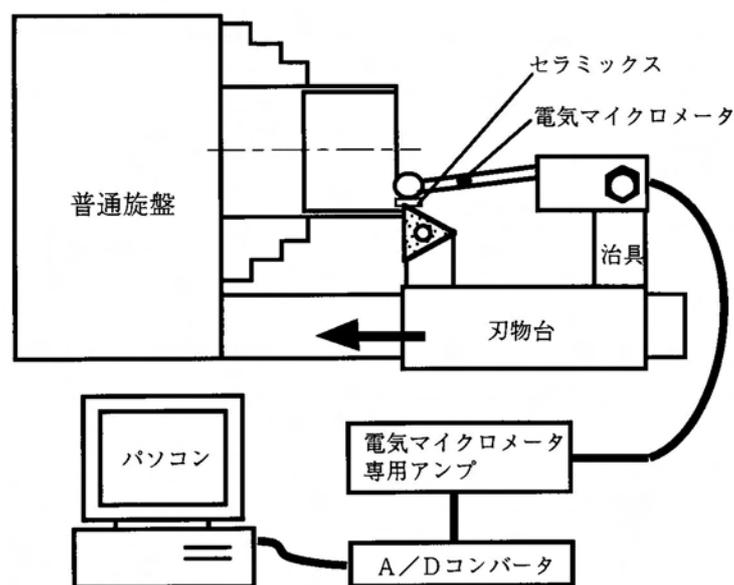


図2.22 工具熱膨張測定装置

を行う。この際、電気マイクロメータを用いて加工中の切込み方向（X軸方向）の工具先端の伸びを実時間測定する。試験片を作る際の問題で肉厚を2mm程度にする必要があり、本研究で問題にしている、仕上げ切削の条件（切り込み0.1～0.5mm）での加工条件では切削が出来ない。ここでは、工具摩耗がない場合を想定し工具に流入する熱は切りくずとすくい面との摩擦によるものとし、工具のみが熱膨張を起こすものとする。実験装置は図2.22に示すように設定されているが、切削中に工具へ流入する切削熱が電気マイクロメータの測定子へ伝わるのを防ぐために、工具と測定子の接触部分にはセラミックス片を接着している。

図2.23に示すように、加工開始後に工具が伸びそれ以降は緩やかに変位している。切削は75秒で終了し、これ以降工具は冷却され150秒後に熱膨張は元に戻っている。この工具熱膨張の傾向は、図2.10に示した旋削加工後、工作物側から測定した加工誤差と良く一致している。

一宮ら²⁴⁾は旋削加工中における切込み（X軸）方向の工具熱膨張を指数関数で近似している。ここでは、加工誤差を指数関数の最も基本的な形として以下に示す式で近似した。

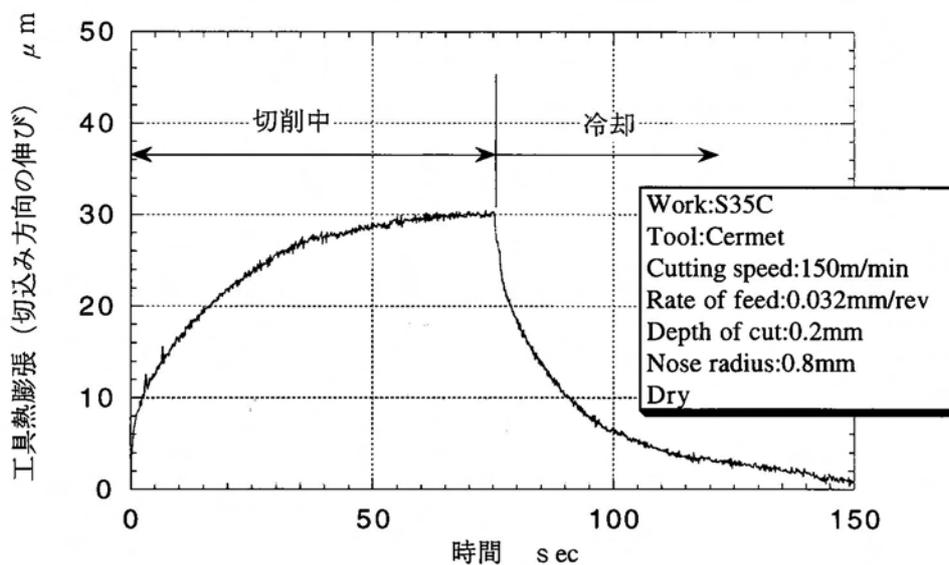


図2.23 工具熱膨張

$$\delta x = C_1(1 - e^{-C_2 t}) \dots (2.8)$$

ここで、 δx = 工具の切込み方向の伸び、 C_1 および C_2 は工作物・工具・加工条件で決定される係数で、 C_1 は熱膨張の絶対値を、 C_2 は熱膨張の応答（傾き）を表す。

2.5.3 工具熱膨張の測定結果

加工条件によって工具熱膨張がどのように変化するかを見るために切削条件を変化させた。工作物材種は材料の物性、ノーズ半径は工具の形状、送りは工具と切りくずの接触状態を変化させるためのものである。

(a) 工作物材種の影響

工作物材種の影響については、炭素鋼に限定して比較する。図2.24に測定結果を示すが、測定結果は式(2.8)を用い関数近似した形式で表している。図2.23で示したように、切削直後に急激に伸びが進行しており、熱による工具の伸びの応答はかなり良いことが分かる。鋼に及ぼす炭素の影響は、一般に、炭素含有量が増すと、比重、熱膨張係数、熱電導率は減少し、比熱、電気抵抗は増加するが²⁵⁾、図2.24の実験結果からは、工作物材種の違いによる、工具熱膨張の差はほとんど確認できない。

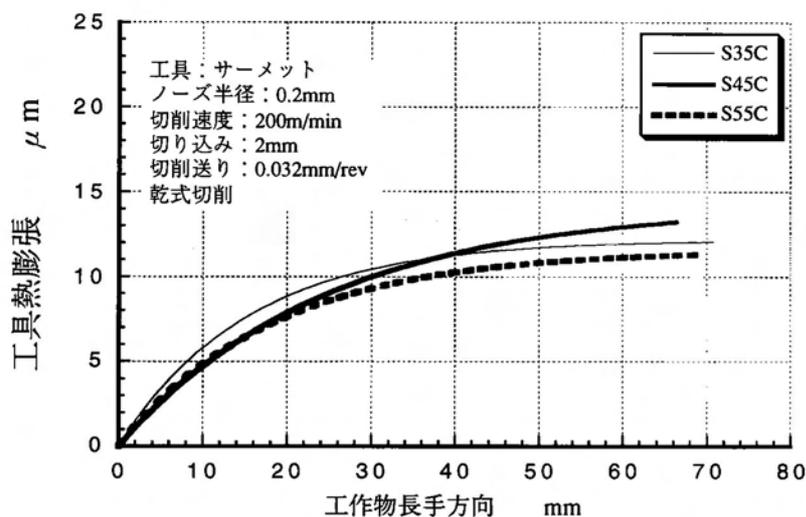


図2.24 工作物材種の違いによる工具熱膨張

(b) 工具ノーズ半径による影響

工具の形状が、熱膨張に与える影響を見るために、スローアウェイチップのノーズ半径を変化させて実験を行った。スローアウェイチップはノーズ半径0.2, 0.4, 0.8mmのものが市販されているが、0.8mmでは、切り込み2mmの今回の条件では、切りくずが巻き付き測定不能であった。

図2.25 にノーズ半径の違うスローアウェイチップで切削したときの工具熱膨張を示す。図よりノーズ半径の小さいR0.2mmの方が熱膨張が大きくなっている。

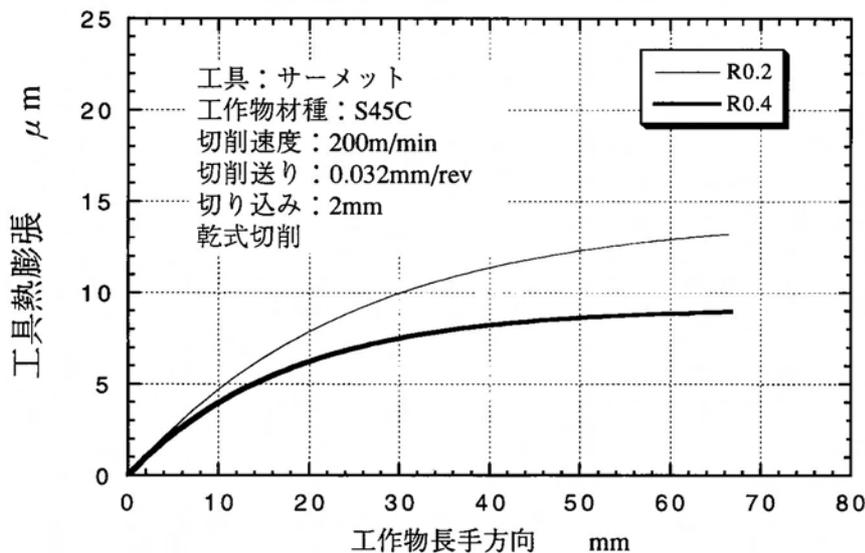


図2.25 ノーズ半径の違いによる工具熱膨張

(c) 送りによる影響

図2.26 に送りを0.032mm/revと約2倍の0.065mm/revで実験を行った結果を示す。送り方向の切りくず厚さが2倍になり切削抵抗も増大し、工具熱膨張も大きくなっている。送りをパラメータとして比較した場合には、送りが2倍になれば加工時間は半分になり、このデータのみで単純に比較するのではなく時間をパラメータとしたデータ整理も必要になる。

また、送り0.065mm/revの場合には、切削抵抗が大きくなるため0.032mm/revに比べ振動の幅が大きくなっている。

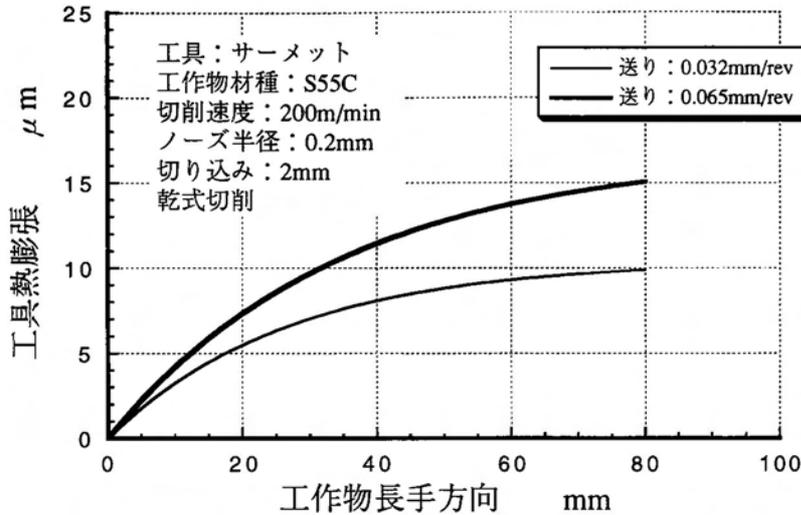


図2.26 切削送りの違いによる工具熱膨張

2.6 その他の加工誤差要因

切削加工により生ずる熱の80%以上が切りくずに流入し排出されるが、これが下部の切りくず受けに落ちるまでに工作機械の各部に接触し、熱の伝導が行われる。さらにNC工作機械のメリットの1つである長時間運転を行えば、チップコンベアが作動しても工作機械本体への熱の流入は避けられない。高田²⁶⁾は、多数個の自動加工では1個の加工に比べて工具摩耗の影響もあり旋盤の幾何的誤差は2倍になると報告している。また、工作機械の熱変位が定常状態になった状態で加工を行っていても、自動運転の場合稼働中に工作物交換のために時々運転停止が入り熱変形の定常状態はほとんど期待できない。さらにNC工作機械は、構造上送り機構にモータと直結したボールねじを使っており、ボールねじの熱膨張が位置決め誤差を生じ加工精度の低下を招く²⁷⁾。旋盤の場合、主軸台とベッドとの締結位置によって主軸中心と刃物台との相対熱変位が変わり、熱変位を最小(1/3)にする締結位置が存在することが分かっており²⁸⁾、逆にこれらを積極的に構造設計に生かしている。

高精度加工では、環境温度の変化も無視できない。近年、高精度を要求される部品

の加工には、空調された工場内で行われているが、この場合でも工作機械周辺の空気流速が不均一だと熱伝達係数が場所によって違ってくる。

NC 工作機械では、機械系の誤差に運動制御系の誤差も加わる。運動制御系の精度は、最小設定単位、サーボ方式（オープンループ方式、セミクローズドループ方式、フルクローズドループ方式）、サーボ系の速度追従能力、バックラッシュ補正やピッチエラー補正などで決まる。代表的なものとしては、同時2軸運動での各軸も位置ループゲインの不一致のため運動誤差の軌跡が楕円状にひずむ現象があげられる。

2.7 第2章のまとめ

本章では、補正加工を行う際に必要な加工誤差要因を特定するために、旋削加工時に起こりうる加工誤差、特に工作物の寸法精度に影響を及ぼすものについて検討した。更に、全ての測定の際には工作物を旋盤から取り外すこと無く、かつ、測定器を全て工作機械上に設置し外部の基準を用いないオンマシンで行うシステム構成とした。

旋盤の幾何誤差をオンマシンで測定するための新たな測定システムを提案し開発を行った。このオンマシン測定システムは、次のような特徴がある。

- (1) JIS に基づいた「旋盤の試験及び検査方法」での評価が可能で、通常検査に必要なテストバーを必要としない。
- (2) 加工後の工作物外形を利用して測定をするため、工作物を取り外す必要が無いので、測定に際し取り外し・取り付けによる誤差を取り除くことが出来、高精度な測定が可能となる。
- (3) 測定データから旋盤の幾何誤差を容易に計算することができ、残りのデータから旋盤の幾何誤差を取り除いた切削現象による加工誤差も容易に求めることができる。

工具摩耗が工作物の寸法精度に及ぼす影響を調べるために、工具の逃げ面摩耗を測定した。この測定された逃げ面摩耗幅から工作物の寸法精度に影響を与える刃先の切り込み方向の後退量を計算した。その結果、工具逃げ面摩耗幅の約10%が工具切り込

み方向の後退量になる。通常逃げ面摩耗幅が0.2mmになると精密切削における工具の寿命とされており、その時の工具切り込み方向の後退量は20 μ mになる。この数値は旋削加工の高品位化においては無視出来ない値である。しかし、工具逃げ面摩耗の進行は初期状態の後、定常摩耗（緩やかに摩耗が進行する）状態が一定期間続き、その後加速摩耗状態になり工具寿命を迎える。旋削加工では、1つの製品を加工するのに多くの時間を必要としないので、その間の工具摩耗の進行はないものとする。また、定常摩耗状態で工具を使用するように工具の切削距離（切削時間）を管理し、1つの工作物を加工するのに要する時間から工具摩耗を予め求めておけば、工具摩耗による加工誤差を補正することが可能になる。

切削抵抗による工作物や工具のたわみを測定し、工作物の寸法精度に与える影響を調べた。測定された背分力から工作物を不静定ばりと考えて切り込み方向のたわみを計算した結果、 $\phi 30 \times 200$ の炭素鋼を仕上げ条件で加工した場合に0.8 μ mであった。また、切削抵抗による工具のたわみが工作物の切り込み方向に与える影響についても、主分力による工具ホルダのたわみとして計算した結果、上記と同様の加工条件で $0.15 \times 10^3 \mu$ mであった。

旋削加工中に発生する熱によっておこる工具熱膨張が、工作物の寸法精度に与える影響を調べるためにパイプ状工作物の二次元切削を行い、実時間で切削中の工具先端の伸びを測定した。その結果、加工の進行に伴い、最初は急激に伸びそれ以降は緩やかに伸びていることが分かった。この伸びは約15 μ m程度あり、工作物の寸法精度に大きな影響を与える。ここではこれを簡単な指数関数の形に置き換えた。

上記以外に工作物の寸法精度に影響を与える要因を考えると、機械の熱変形がある。これは、時間によってその変形が変化するが、旋削加工の場合には加工効率が良いので、1つの工作物を加工するのにさほど時間を要しないため、この間の変形は定常状態と考えることが出来る。そこで加工する前に「2.2 旋盤の幾何誤差測定」で提案した手法により旋盤の幾何誤差を予め測定しておき、精度制御に活かす。サーボ系の誤差についても、粗加工が終了した段階で、幾何誤差を測定しておけば、熱変位の場合と同様に補正が可能である。

第2章の参考文献

- 1) 垣野義昭, 谷口博之, 安井誠, 上杉憲一: 工作機械の直線運動誤差の測定法に関する研究, 精密機械, 48, 2 (1982) 239.
- 2) J. B. Bryan : A Simple Method for Testing Measuring Machines and Machine Tools, Part 1 : Principle and Applications, Precision Engineering, 4, 2, (April 1982).
- 3) 河野嗣男, 面田学, 岡崎祐一, 小沢則光, 三井公之: インプロセス計測加工精度補償の研究 (第1報) -加工面基準制御加工法の原理と基礎実験-, 精密工学会誌, 54, 8 (1988) 1463.
- 4) 戸沢幸一, 佐藤壽芳, 大堀真敬, 駒崎正洋: 工作機械の真直度と加工精度の関連に関する研究, 日本機械学会論文集 (C編) 47, 419 (1981) 909.
- 5) 清野慧, 奥山栄樹, 住田正臣: 平面のうねり形状の測定に関する研究 (第2報) -形状測定とデジタルフィルタ, 精密工学会誌, 54, 3 (1988) 513.
- 6) 高偉, 清野慧, 奥山栄樹: ソフトウェアデータムによる形状の絶対測定, 精密工学会誌, 60, 4 (1994) 554.
- 7) 山口城治: 改良逐次3点法による直線運動精度の計測, 精密工学会誌, 59, 5 (1993) 773.
- 8) JIS B 6202: 旋盤の試験及び検査方法 (1986)
- 9) JIS B 6191: 工作機械 - 静的精度試験方法及び工作精度試験方法通則 (1993)
- 10) JIS B 6202: 旋盤の試験及び検査方法 (1986)
- 11) JIS B 7545: テストバー (1982)
- 12) (株) キーエンス, レーザ寸法測定器 LS シリーズ取り扱い説明書 (1995)
- 13) 竹内芳美, 坂本正史, 浅尾晃通, 井村公二: パーソナルコンピュータによるNC旋盤のDNC化 (第3報) -旋削加工誤差の自動測定とその評価, 精密工学会誌, 53, 6 (1987) 902.
- 14) 東芝タンガロイ切削工具カタログ (1995)
- 15) JIS B 4011: 超硬バイト切削試験法 (1971)

- 16) 切削加工論：中山一雄，コロナ社（1984）162.
- 17) 切削加工論：中山一雄，コロナ社（1984）95.
- 18) 材料力学 - 上巻 -：中原一郎，養賢堂（1965）139.
- 19) 機械工作法：和栗明ほか10名，養賢堂（1975）165.
- 20) A. O. Schmidt, W. W. Gilbert, O. W. O. W. Boston :A Thermal Balance Method and Mechanical Investigation of Evaluating Machinability, Trans. ASME, 67(1945)225.
- 21) 機械製作法通論（下）：千々岩健児編，東京大学出版会（1982）257.
- 22) K. Gottwein:Die Messung der Schneidentemperatur beim Abdrechen von Flusseisen, Maschinenbau,4(1925)1129.
- 23) A. N. Backwell, W. H. Giedt:Temperature Distribution in the Tool-Chip Contact Area, Proc. 1967 Semi-Int'l Symposium, Heat Transfer, JSME,2(1967)223.
- 24) 一宮亮一，川原英昭：切削加工中における熱変形に関する研究（第1報）丸棒被削材の外周面旋削加工における被削材および工具のびびり -，日本機械学会論文集（第3部）37，296（1971）826.
- 25) 工作マニュアル①基礎編：工作マニュアル編集委員会編，（1982）160.
- 26) 高田孝次：旋削加工精度の向上に関する研究，機械技術研究所報告第105号（1970）7.
- 27) 大塚二郎，深田茂生，小淵信夫：ボールねじの熱影響に関する研究，精密機械，50，4（1984）8.
- 28) G. Spur and H. Fischer : Thermal Behaviour of NC Machine Tools, Proc. 14th Int. MTDR Conf., (1969)147.

第3章 オンマシンによる 旋削加工誤差補正システムの開発

3.1 緒言

一般の鉄鋼材の旋削加工では直径方向で20～30 μm の加工誤差は避けられず、それ以上の精度を確保しようとするれば、旋削加工の後、研削加工をしているのが普通である。高精度加工が要求されている今日、一般の機械加工での加工精度と超精密加工での加工精度の間を埋める努力が早急にされなければならない。生産現場で使用されている旋盤を用いて、旋削加工のみで鉄鋼材の加工精度を容易にミクロンオーダにすることが出来れば、使用する工作機械が減り、加工工程も少なくなるなど実用的には大変有用である。

近年最小設定単位が1 μm （工具の実設定単位は半径方向で0.5 μm ）のCNC旋盤が多く市販され、より精密な工具経路生成が可能になり形状精度は向上している。しかし、精密な工具経路生成が可能になったとはいえ、その高分解能が十分に発揮された加工が行われているとはいえない。それは、工作機械（正確には刃物台・工具と工作物の相對運動）の設定単位が小さくなりより正確に動作することと、加工誤差の発生とは無関係なためである。本章では、最小設定単位1 μm のCNC旋盤を用いて、そ

の設定単位に近い加工精度を補償する加工精度補正方式とその実験結果について述べる。

高精度旋削加工を実現するために、最小設定単位を小さくしても、バイトが正しく送られていなかったり、切れ刃に発生する構成刃先などによって正しく旋削加工が行われないと、高い精度を確保することは不可能である。そこで、次のような点について検討する必要がある。

(a)工具（刃物台）切込みの最小設定単位を小さくしても工具が追従するか。

(b)最終的な仕上げ面粗さをどの程度小さく出来るか。（第4章で考察）

本章では、(a)については実験を行い、実験結果から証明する。(b)についてはここでは挙げないが、第4章で考察する。

市販のCNC旋盤に汎用のバイト、材料を用いて、上記の(a)、(b)について問題が無いのか、あるいはこの問題が解決されて、最小設定単位量の切り込み（工具移動）が可能になれば、規則性のある加工誤差を補正することができる。例えば旋削した工作物の形状をオンマシンで計測したり（第2章参照）、あるいは何らかの方法で加工誤差に相当する量だけNC加工中の工具経路を修正しながらその加工精度を制御することができれば、より精度の高い製品を得ることができる。

本章では、CNC旋盤の最小設定単位を $1\mu\text{m}$ に限定し、加工誤差に相当する量だけ修正されたNC命令によって加工精度を制御する手法を示す。

加工誤差補正方法には、図3.1に示すように、加工中の工作物寸法を常に測定しながら補正を行うフィードバック方式と、予め加工誤差を計算しておきその加工誤差を考慮した経路で加工するフィードフォワード方式がある。フィードバック方式には、河野らの工具の後部に光学センサを取付け加工後の寸法誤差（直径方向）を実時間で測定し刃先位置を圧電素子で制御する加工面基準制御加工法¹⁾などがある。これはダイヤモンド工具による切削で切りくずはバキュームで吸引しているなど条件が特殊である。実際の鉄鋼材の切削では切りくずの飛散や切削液の雰囲気中におけるセンサの精度、そのデータを解析するためのハードウェアの信頼性や処理能力に問題がある。本論文では加工中にセンサを用いない方法としてフィードフォワード方式を採用する。

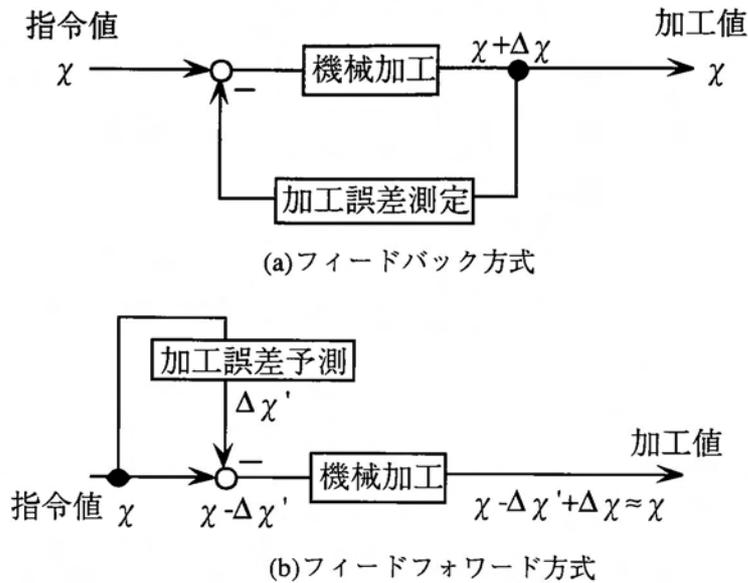


図3.1 加工誤差補正方法

加工誤差の補正方法としては、次のような方法が考えられる。

(a) 計算機内に加工誤差モデルを作り、このモデルによって時々刻々加工誤差を予測し、実時間で補正されたNC命令を用いて旋削する。

(b) 種々の工具や被削材に対して切削条件を変えた実験を行い、そのときに生じる加工誤差をデータベースとして計算機内に蓄えておき、このデータを用いて加工誤差を予測し、NC命令を修正して旋削する。

(c) 加工誤差をオンマシンで簡単に自動測定できるシステムを作り、データ収集のため切削あるいは適当な間隔でサンプリングした工作物の形状精度を計測し、その加工誤差を知りNC命令を修正する方法。

(a)の方法が理想であるが、現時点での有限要素法²⁾などを利用した加工誤差モデルは切削抵抗や切削熱の算出において物性値に基づく不確定要素が多く、その表現は非常に複雑である。生産量が多ければ(c)の方法でも良いが単品あるいは少量生産の場合には、測定に時間がかかり能率が落ちてしまう。本章では、(b)のデータを集める方法で研究を行う。

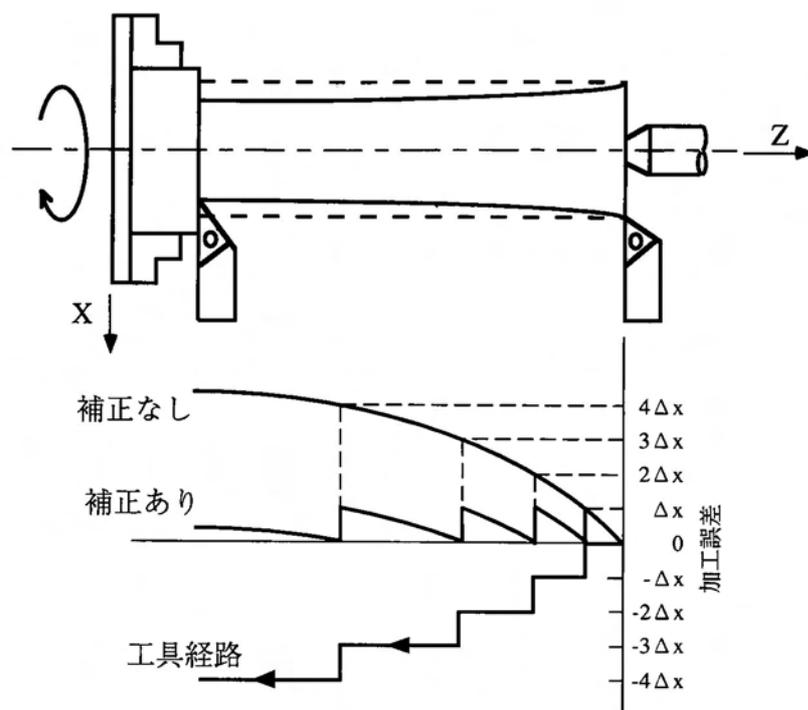


図3.2 加工誤差補正方法

3.2 NC 命令修正方式による補正

3.2.1 補正方法

前述の考えに基づき、旋削中の加工誤差を取り除くには、直径方向の加工誤差量だけ加工物の半径方向に工具（刃物台）を前進又は後退させればよい。NC工作機械は機械に応じて、1パルス当たりの最小駆動単位 Δx が決められているため、予め計算された加工誤差量と Δx を比較して加工誤差が Δx を越えるごとに切り込み方向（X方向）に工具を前進又は後退させる。図3.2に補正方法を示す。第2章ではこの工具熱膨張を簡単な指数関数で近似した。旋削加工の加工誤差は、機械の幾何誤差を除けば工具熱膨張による切り込み方向の加工誤差であると仮定して、これを簡易加工誤差近似関数と呼ぶ。

$$f(x) = C_1(1 - e^{-C_2x}) \dots (3.1)$$

ここで、 C_1 、 C_2 は工具、工作物や加工条件によって決定される係数である。 C_1 は加工誤差の絶対量を、 C_2 は加工誤差の応答（傾き）を表す係数である。実際には、第5

章で述べる加工誤差自動測定システムを用いて測定された加工誤差データを (3.1) 式に代入し、最小二乗法により C_1 , C_2 を算出した。 C_1 , C_2 の値は、工具摩耗の影響を考慮して、工具摩耗が定常状態のときの平均値とした。加工誤差補正プログラムでは、工具の伸びを時間間隔 Δt (または、工作物長手方向の距離 Δx) ごとに計算し、これを Δx と比較する。時間 t_i における工具の変位を d_i とすると、修正された新しい X 座標、およびそのときの送り方向 (Z 方向) の位置 z は、円筒形状の場合次のようになる。

$$z = z_0 - t_i \cdot N \cdot s$$

$$x = x_0 + 2 \cdot \Delta x \cdot \left[\frac{d_i}{\Delta x} \right] \dots (3.2)$$

ここで、 x_0 , z_0 は切削開始位置であり、 N は回転数 (rpm), s は送り (mm/min), [] はガウス記号を表す。工具移動の命令は相対座標系で計算する。

図3.3に旋盤の幾何誤差測定で述べたシステムを使い、旋盤の幾何誤差を取り除いたものを示す。測定された加工誤差データを (3.1) 式で近似したのもも示すが、この簡易加工誤差予測曲線は実際の加工誤差をよく表している。表3.1は加工条件を様々に変化させて実験を行い、 C_1 , C_2 を求めたものである。この値はデータベースとして計算

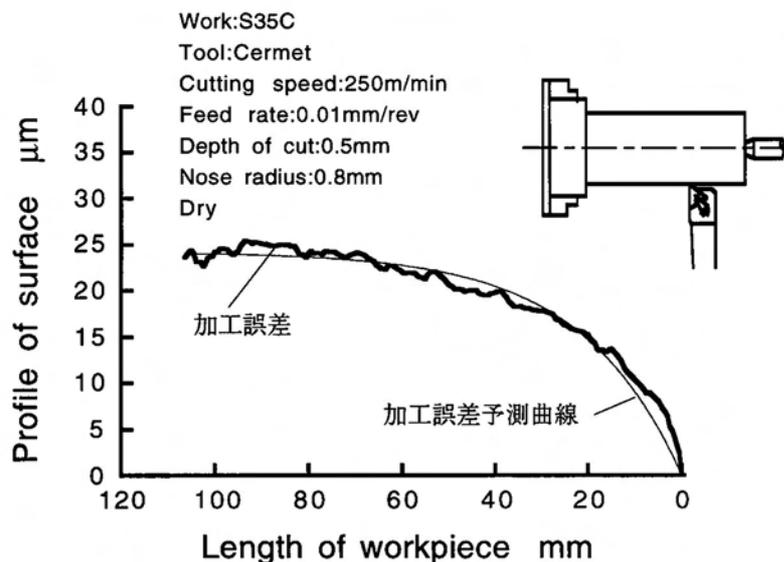


図3.3 旋削加工誤差例

表3.1 各種加工条件に対するC₁, C₂

Tool	a mm	f mm/rev	v m/min	C ₁	C ₂
Cermet	0.5	0.05	150	8.54	0.38
			200	8.65	0.39
		0.08	150	9.18	0.35
			200	9.61	0.37
		0.12	150	8.58	0.37
			200	8.65	0.43
Coated (TiN)	0.5	0.05	150	12.84	0.38
			200	8.76	0.39
		0.08	150	11.95	0.35
			200	9.63	0.37
		0.12	150	15.13	0.37
			200	11.09	0.43

機内に蓄えておき、自動プログラミングシステムの補正加工用仕上げ工程に組み込まれる。

3.2.2 NC装置の切り込み方向信頼性

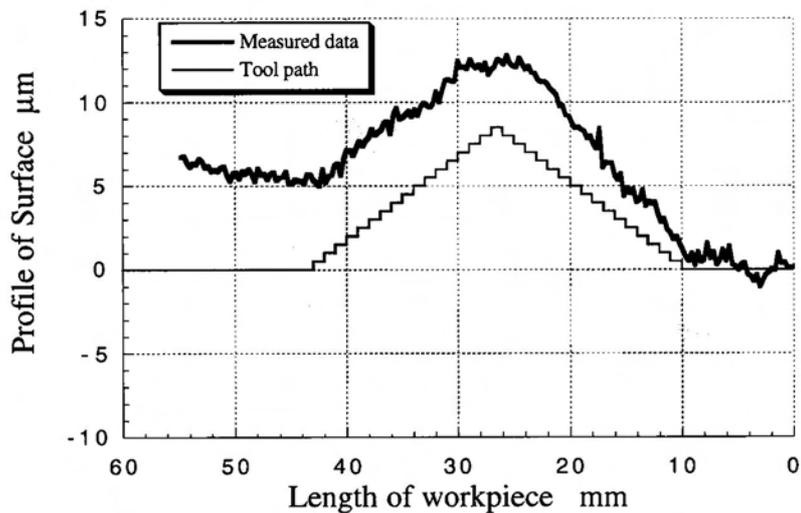
前述のように、本補正方法は切削中に刃物台を1パルスずつ切り込み（X軸）方向に移動させるが、この時スティックスリップやバックラッシの影響（本CNC旋盤はバックラッシ補正機能を搭載）が無く、実際に1パルス分だけ移動し切削されているか否かは非常に重要である。そこで、加工誤差補正システムの有効性を確認するために、以下のような外丸削りを行った。

(a) 20mm同一直径で切削し、そこから1mm進むごとに工具を1パルス分、つまり直径方向で1 μ mだけ切り込む。これを17回繰り返す、さらに1mm進むごとに工具

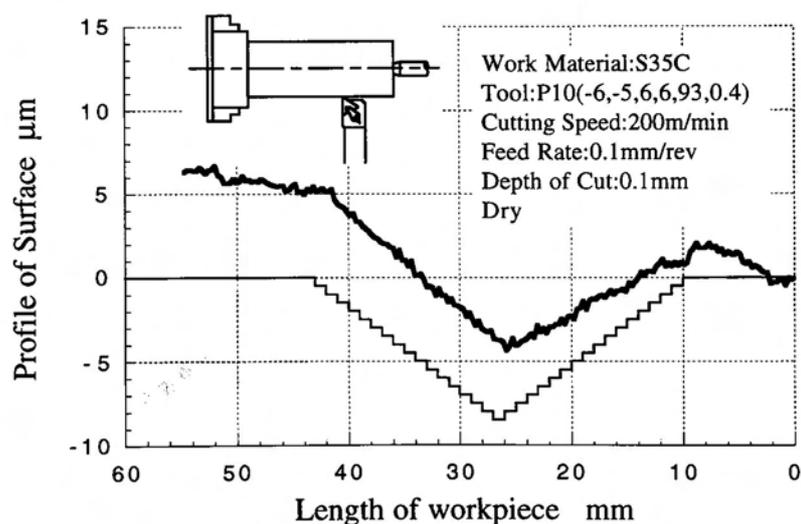
を1パルス分工具を引く動作を17回繰り返す、30mm 同一直径で切削する。

(b) 20mm 同一直径で切削し、そこから1mm進むごとに工具を1パルス分引く。これを17回繰り返す、さらに1mm進むごとに1パルス分工具を切り込む動作を17回繰り返す、30mm 同一直径で切削する。

この時の指令値と加工後の表面形状の測定値を図3.4(a), (b)に示す。図の横軸は長手方向（右側がセンタ側）を、縦軸は断面形状（上側が工作物側）を表しており、加工条件は図中に示す通りである。図3.4(a)では切削開始から10mm以降刃物台を切り込ん



(a)切り込む→引く→切り込む



(b)引く→切り込む→引く

図3.4 切り込み方向信頼性の実験

だ時点から工作物の直径が減少し、27mmから増加している。図3.4(b)では逆に10mm以降刃物台を引いた時点から工作物の直径が増加し、27mmの時点から減少し、44mmからは通常の加工誤差のみの断面形状の状況に戻っている。断面形状は工具経路に加工誤差を上乗せしたものになっている。それぞれの工具経路と加工誤差の差の傾向は図3.3と一致している。つまり、CNC旋盤のX軸バックラッシュ補正の効果もあり最小設定単位の指令に対して最小設定単位の値まで実際に切削されている。

本加工精度制御システムでは、予め加工実験を行いその加工誤差データを基に簡易加工誤差近似関数の係数 C_1 、 C_2 を求めておき、データベース化している。図3.5に新しい状態のスローアウェイチップで切削加工を始めたときの、切削距離に対する C_1 、 C_2 の変化を示す。 C_2 は切削距離によらず一定の幅内で推移しているのに対して、 C_1 は20000mを越えた時点で値が変化している。この際、チップが摩耗しチップブレイカの消失により切りくずが工作物に絡み付き切削不能になった。また、図3.6に C_1 の値と加工物の表面粗さを示す。

図3.7には、図3.6で示した実験において切削距離がそれぞれ4500m、13600m、26000mのときのチップ先端の電子顕微鏡写真を示すが、コーティング層がはく離すると急激にフランク摩耗やクレータ摩耗が進行している様子がわかる。これらの結果から、加工誤差近似関数表現を用いて加工精度制御が行えることがわかる。

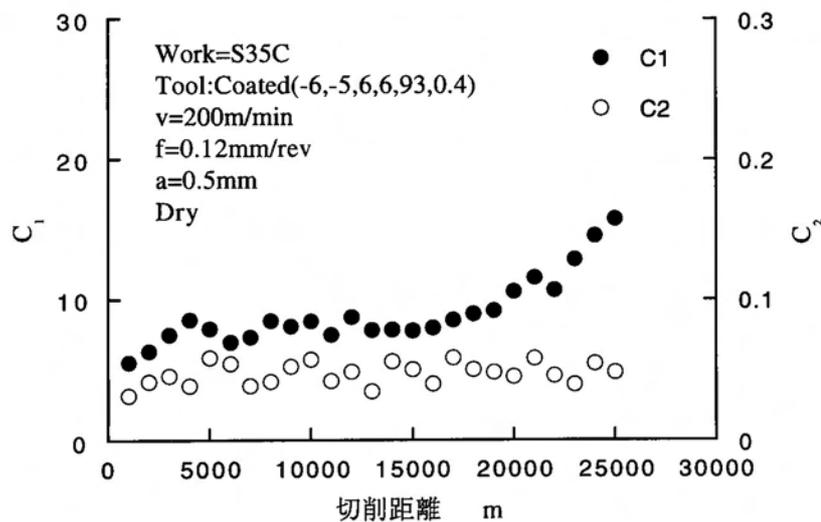


図3.5 切削距離に対する C_1 、 C_2

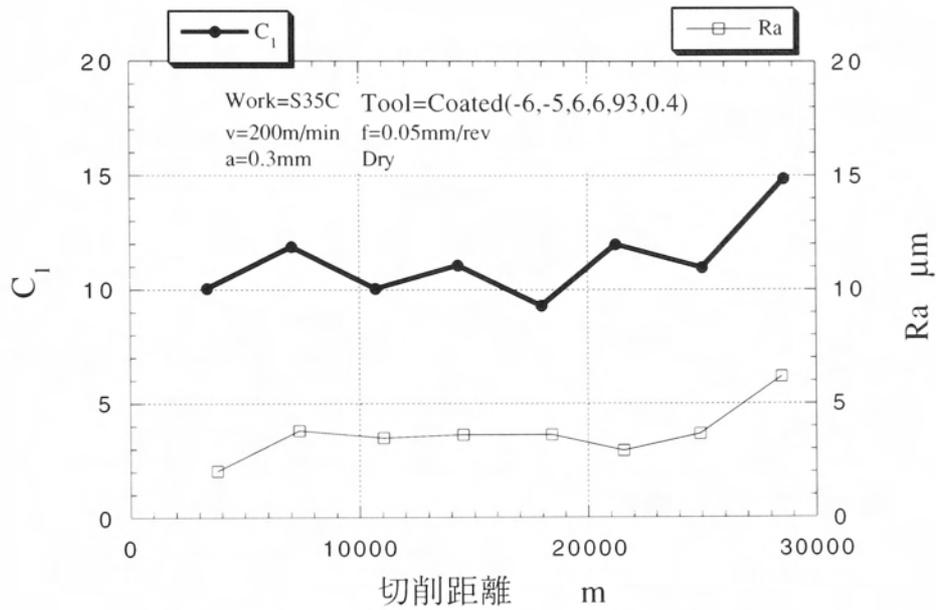
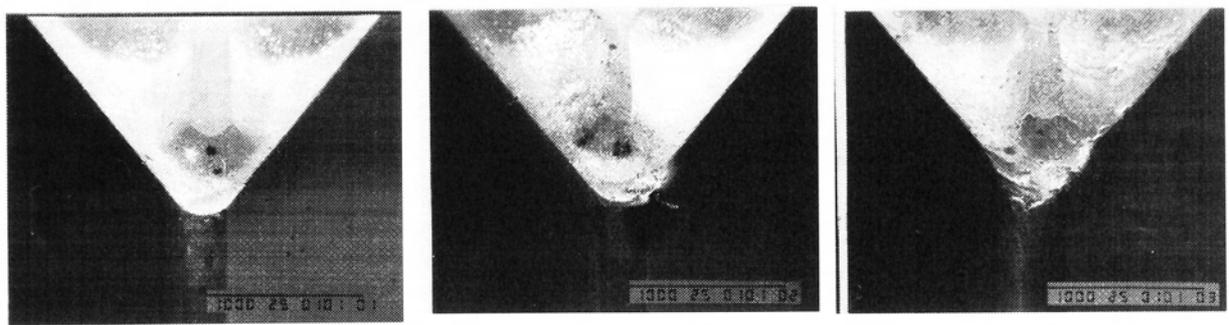


図3.6 切削距離に対する C_1 と表面粗さ



(a)切削距離 4500m (b)切削距離 13600m (c)切削距離 26000m

図 3.7 切削距離に対する工具摩耗

3.3 人工ニューラルネットワークによる加工誤差のデータベース化

3.3.1 人工ニューラルネットワークの概念

前述のように旋削加工誤差予測曲線を用いた工具経路修正を行うことにより、加工誤差をCNC旋盤の設定単位近傍にまで抑えることが可能となった。しかし、工具・工作物材種や形状、切削速度、切り込み、送り、切削油の有無、工具摩耗、工作機械の幾何的誤差、加工環境など、数多くの加工条件全てにおいて予め加工実験を行い、データベースを用意するのは事実上不可能である。加工誤差を理論的に算出することも不可能に近い。加工条件より式(3.1)の係数 C_1 、 C_2 が関数で表現できればよいが、加工現象には現在でも解明されていない部分が数多く存在するのでそれも不可能である。データベースを単に関数化してもこの問題を解決することは出来ない。既存のデータベースからデータベースに存在しない切削条件の係数を推定する必要がある。

データベースを、最小二乗法などで近似する方法があるが、上記のようにパラメー

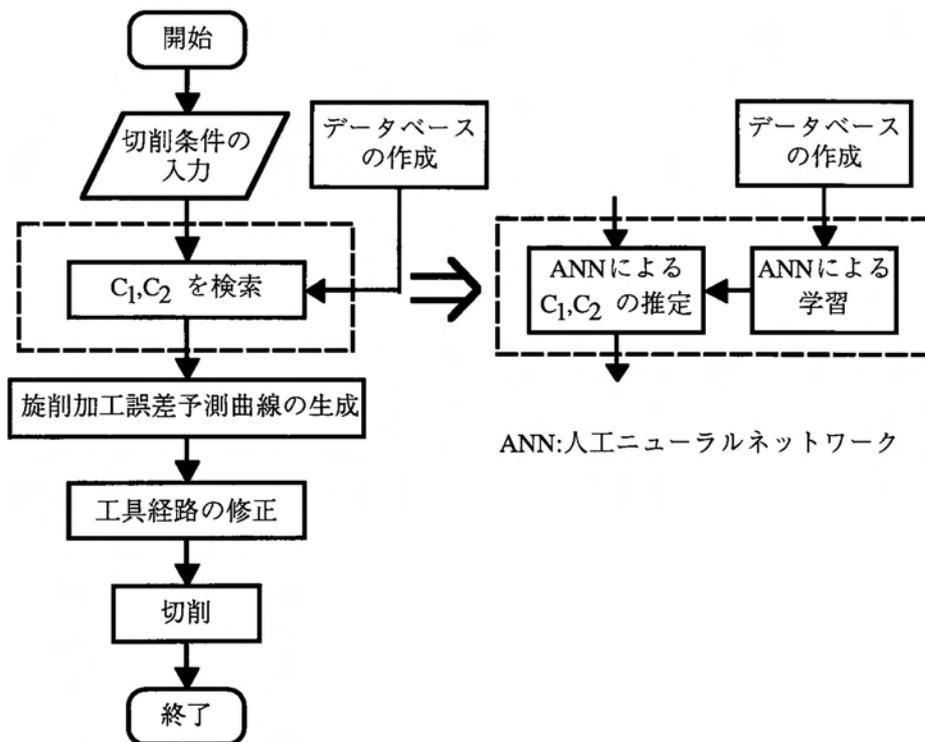


図3.8 ANN利用による加工誤差補正

タが多く現実には不可能である。

ここでは、人工ニューラルネットワーク（Artificial Neural Network, 以下 ANN）を用いることにより簡易加工誤差近似関数中の係数 C_1 , C_2 を推定する。すなわち、この ANN による係数の推定を加工誤差補正システムに組み込むことによって、データベースの最大・最小の範囲内で存在する加工条件内で柔軟に対応できる加工誤差補正システムの構築を目的としている。図 3.8 に ANN を用いた加工誤差補正システムの概念図を示す。

ANN の概念は、非線形な出力関数をもつニューロンモデルを人工的に多数結合し並列分散的に情報処理を行う。データの特徴量をアナログ的にパターンとして学習することで出力値を推定する³⁾。また、前回の学習結果を次回の学習に活かすことが出来ネットワークの精度が向上する。このように入力と出力間の複雑な解析を必要としないため、切削現象のように加工条件から理論的に算出が困難である表面粗さの予測⁴⁾やその実態を実験的に解明することさえ困難といわれている研削条件の最適化に応用されている⁵⁾。

ANN のタイプとしては、大きく分けて 2 つのタイプがあり、全てのニューロン間

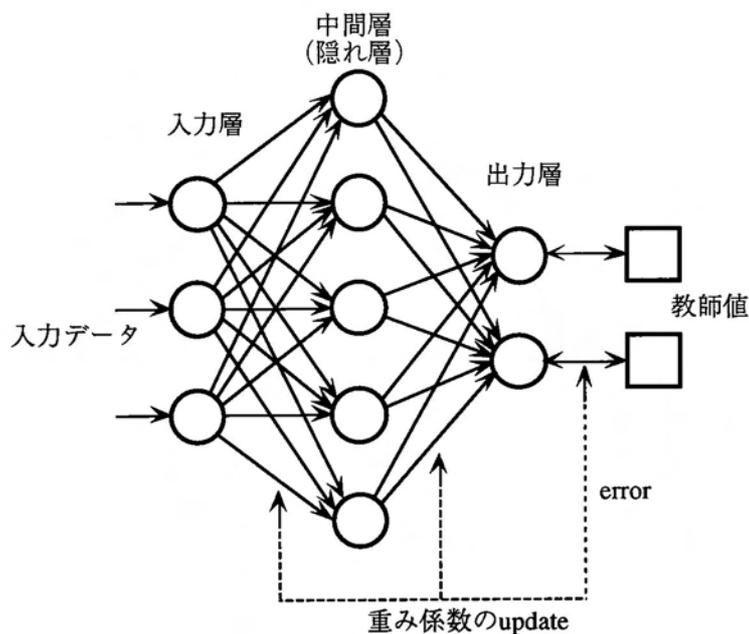


図 3.9 ANN の構造

で結合関係を持ち任意のユニット間に双方向の流れを持つ相互結合型と、処理の流れが層間で一方向な処理がなされる階層型がある。相互結合型ネットワークには、アソシアトロン、ホップフィールドマシン、ボルツマンマシン等があり、階層型ネットワークには、パーセプトロン、コグニトロン等がある⁶⁾。階層型ネットワークでは、入力層から入ったデータがニューロン間の結合重みに応じて次々と伝播されていく。従って、このタイプのネットワークは入力情報の分類、パターン認識等に向いていると考えられている。本研究では、加工条件に対する係数 C_1 、 C_2 の変化の様子をあるパターンと考え、図3.9に示す誤差逆伝播学習法による階層型ネットワークで全結合の3階層とした。入力のパラメータは、切削速度、送り、切り込みの3種類とした。

今回の加工誤差モデルの学習に適したユニット数を決定するため、隠れ層のユニット数を変化させたANNをそれぞれ構築し、予備実験を行った。このANNに切削実験で得られた全てのデータを学習させ、各ANNが10万回学習する毎に出力した値と教師値（最初に与えた切削実験で得られた全てのデータ）との差をとり、その標準偏差を算出した。図3.10に隠れ層のユニット数を変化させた時の学習回数と標準偏差の値を示す。本研究では図3.1に示すCNC旋盤の最小設定単位（ $1\ \mu\text{m}$ ：半径方向で $0.5\ \mu$

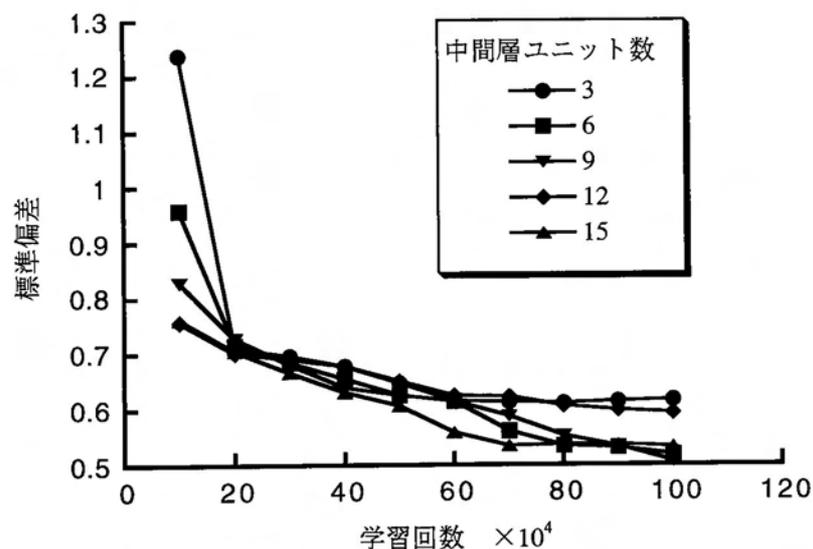


図3.10 中間層のユニット数によるネットワークのパフォーマンス

m) を利用したフィードフォワード方式により誤差補正を行う。そこで、出力誤差の標準偏差が0.5をANNのしきい値と考え、かつ計算時間を考慮して中間層である隠れ層のユニットを6、学習回数を80万回とした。

3.3.2 人工ニューラルネットワークによる加工誤差の学習

ANNの構築のために、切削速度、送り、切り込みにパラメータを限定し、それらの値を変化させることによってANNの学習用データベースを作成する。

表3.2にANNの学習用データベース作成のための実験条件を示すが、加工実験はそのデータの信頼性を高めるために、同じ条件において最低3回の加工実験及び加工誤差を測定を行い、係数 C_1 、 C_2 を求めデータベースとした。なお、加工誤差の測定間隔は0.5mmである。作成したデータベースを表3.3(a), (b)に示す。全学習用のデータは57個である。これら個々のデータが、どのような傾向にあるかをみるために、一部のデータについてグラフ化を行った。図3.11(a)~(d)に、係数 C_1 のグラフを、図3.12(a)~(d)に、係数 C_2 のグラフを示す。ここで、図3.11(a)と図3.12(a)は送りに対しての係数 C_1 、 C_2 を、図3.11(b)~(d)と図3.12(b)~(d)は切り込みに対してまとめたものである。図3.11(a)~(d)より、切り込みが大きいほど、また、切削速度が大きいほど C_1 の値は大きくなる。図3.11(a)より、送りの増加に伴い C_1 は減少するが、0.05mm/rev付近を境に増大す

表3.2 ANN学習用加工条件

Work	S35C
Tool	Cermet (TiC-TiN) TNMG 160404 -6° , -6° , 6° , -6° , 30° , 0° , 0.4
Nose radius	0.4mm
Cutting speed	200, 250, 300m/min
Feed rate	0.02 ~ 0.2mm/rev
Depth of cut	0.1 ~ 0.6mm
Machine tool	Takisawa Co. TC-2

表3.3(a) データベース

v m/min	a mm	f mm/rev	C ₁ μm	C ₂ ×10 ⁻² mm ⁻¹
200	0.1	0.02	8.1	3.9
		0.03	7.2	2.9
		0.04	5.1	2.4
		0.05	4.0	3.4
		0.07	4.5	4.0
		0.10	5.0	3.7
		0.15	7.6	3.2
		0.20	8.0	2.3
	0.2	0.10	8.1	2.8
		0.15	9.2	3.3
	0.3	0.02	12.0	2.9
		0.03	9.3	2.6
		0.04	9.1	3.1
		0.05	8.1	3.5
		0.07	7.9	3.2
		0.10	10.1	3.1
		0.15	11.5	3.4
		0.20	15.3	2.3
	0.4	0.10	12.8	3.0
		0.15	13.4	3.0
	0.5	0.02	16.3	3.2
		0.03	14.4	2.8
		0.04	13.6	3.0
		0.05	13.4	3.1
		0.06	12.6	2.5
		0.07	14.4	3.5
		0.10	15.5	3.0
		0.15	17.3	2.5
	0.6	0.20	15.4	3.3

表3.3(b) データベース

v m/min	a mm	f mm/rev	C ₁ μ m	C ₂ ×10 ⁻² mm ⁻¹
250	0.1	0.10	6.8	3.2
		0.15	8.3	2.5
		0.20	9.1	2.4
	0.2	0.10	9.0	3.2
		0.15	10.5	3.2
	0.3	0.10	11.6	2.1
		0.15	12.6	2.9
		0.20	17.0	2.4
	0.4	0.10	14.3	2.5
		0.15	14.5	2.9
	0.5	0.10	16.0	3.8
		0.15	16.5	2.9
		0.20	18.4	2.5
	0.6	0.10	16.6	3.4
	300	0.1	0.10	9.0
0.15			9.6	2.6
0.20			12.1	2.1
0.2		0.10	11.2	2.5
		0.15	12.4	2.4
0.3		0.10	13.5	2.6
		0.15	14.1	2.5
		0.20	18.7	2.3
0.4		0.10	17.2	2.2
		0.15	15.5	2.9
0.5		0.10	17.9	2.8
		0.15	19.2	2.4
		0.20	20.3	2.3
0.6		0.10	18.5	3.3

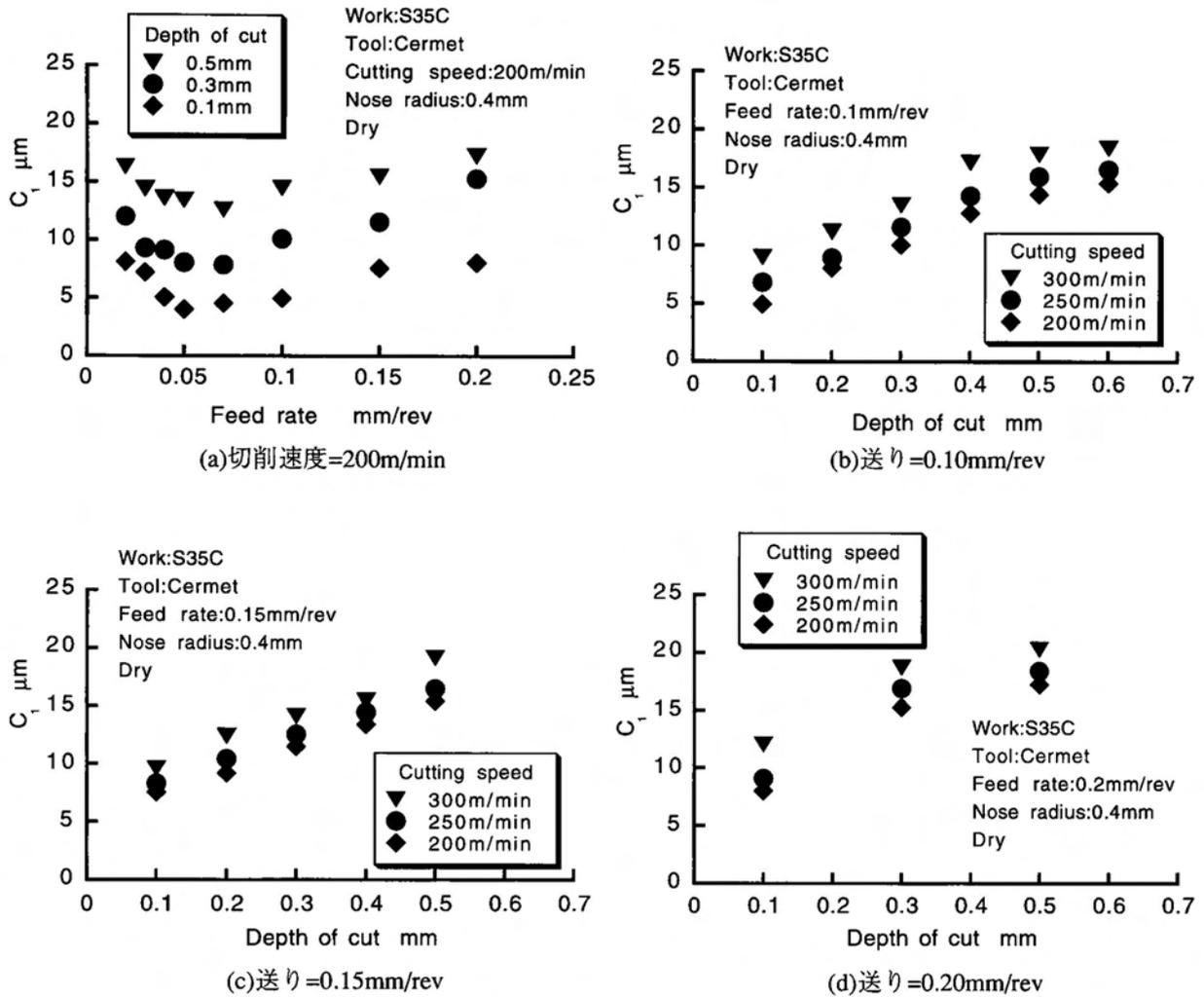


図3.11 実験結果 (C_1)

る. 図3.12(a)および(b)より, 送り0.02~0.1mm/revの加工条件において C_2 の値は, 0.03付近でばらついている. 図3.12(c)では, 送り0.15mm/rev付近で C_2 は切削速度の違いはあるものの, それぞれの切削速度で比べると, 切り込みに関係なくほぼ一様な値を示している. 図3.12(d)より, 送り0.2mm/rev付近では C_2 は切削速度, 切り込みに関係なくほぼ0.023を示している.

以上より, 係数 C_2 には送りが最も影響し, 送りが小さい時には若干のばらつきをみせるが送りが大きくなると切削速度, 切り込みに関係なく一定な値を示すことがわかる.

本研究では, C_1 , C_2 を同時に学習させた場合 C_2 のばらつきの影響が C_1 に及ぶのを

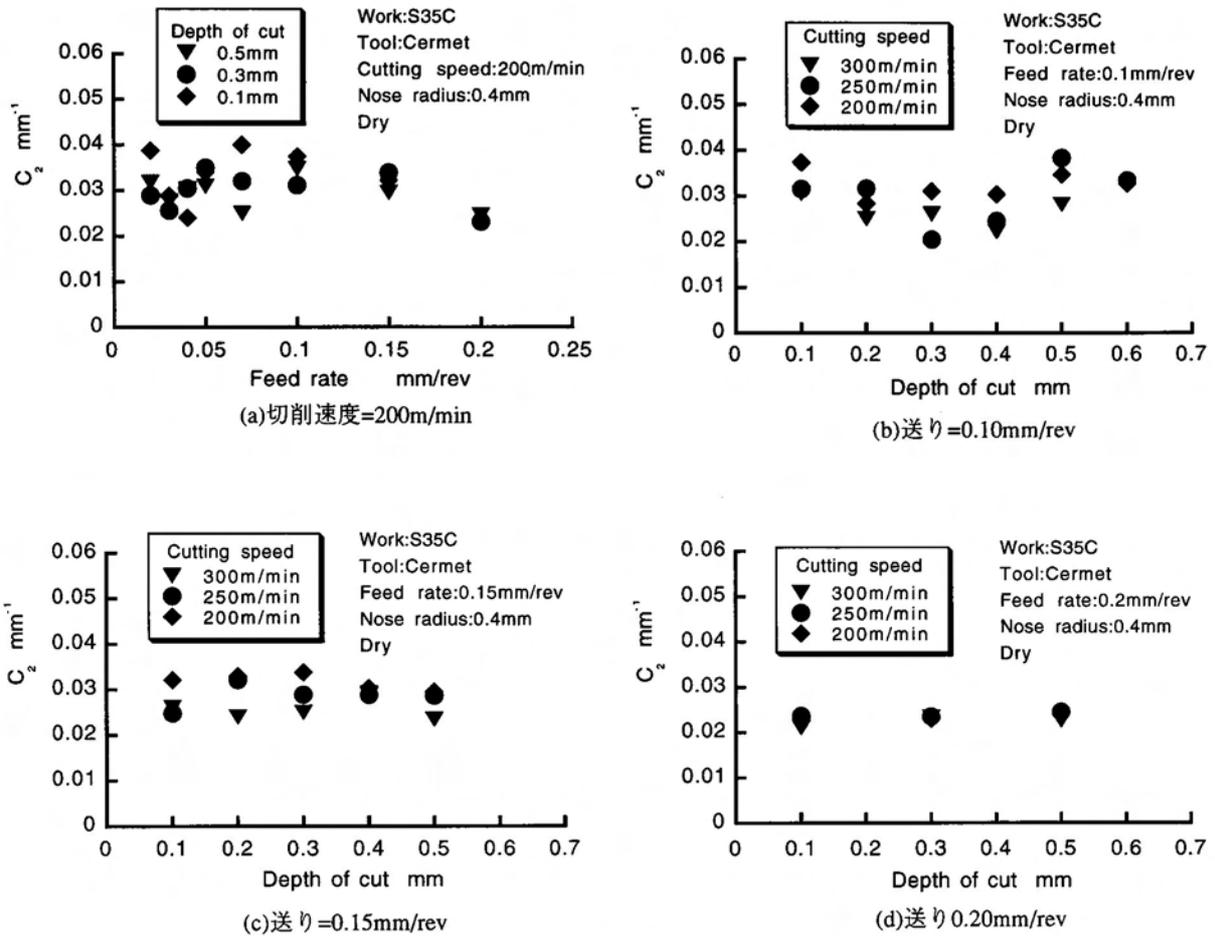


図3.12 実験結果 (C_2)

避けるため、 C_1 、 C_2 のANNを分け2つのANNを構築し用いることで別々に値を学習・推定する。

3.3.3 人工ニューラルネットワークによる加工誤差の推定

実験により求めた加工誤差近似関数の係数 C_1 、 C_2 を用いて学習させたANNに、元のデータベースに存在しない加工条件を入力し C_1 、 C_2 の推定を行う。図3.13に送りをパラメータとして、データベースに存在しない加工条件について C_1 の推定を行った結果を示す。グラフには、データベース内の加工条件 (■) だけでなくその間の加工条件 (○) も推定されているが、これは推定値を線状のプロットにすることによりANNの推定値の傾向を分かり易くするためである。ここで、データベース内に存在する値と、ANNによって推定された値との標準偏差を計算すると図中に示すように、0.57で

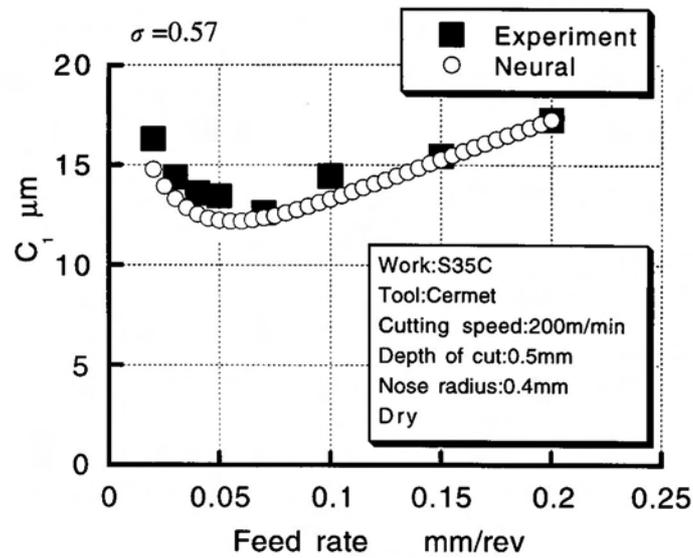


図3.13 ANNによる C_1 の推定
(切削速度=200m/min, 切込み0.5mm)

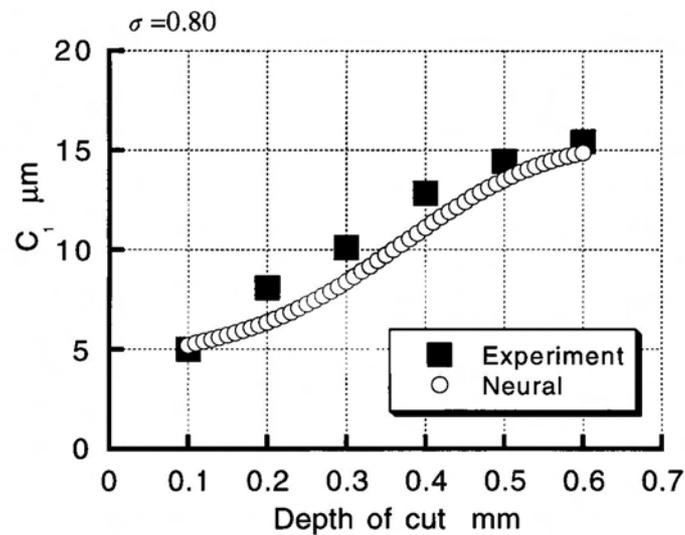


図3.14 ANNによる C_1 の推定
(切削速度=200m/min, 送り=0.1mm/rev)

あった。加工誤差近似関数の中での C_1 の値は誤差の絶対値を表す値であり、この値の推定誤差のばらつきが $0.57 \mu\text{m}$ であることを示している。本研究では、最小設定単位が $1 \mu\text{m}$ (半径方向 $0.5 \mu\text{m}$) のCNC旋盤での精度と限定しており、この結果は、最小設定単位と同等の精度で推定が行われているといえる。

図 3.14 には切り込みをパラメータとした場合の推定値を示すが、標準偏差が0.8となっており、先ほどよりも推定精度は若干落ちているが、その傾向や値もほぼ最小設定単位近くの値を示している。

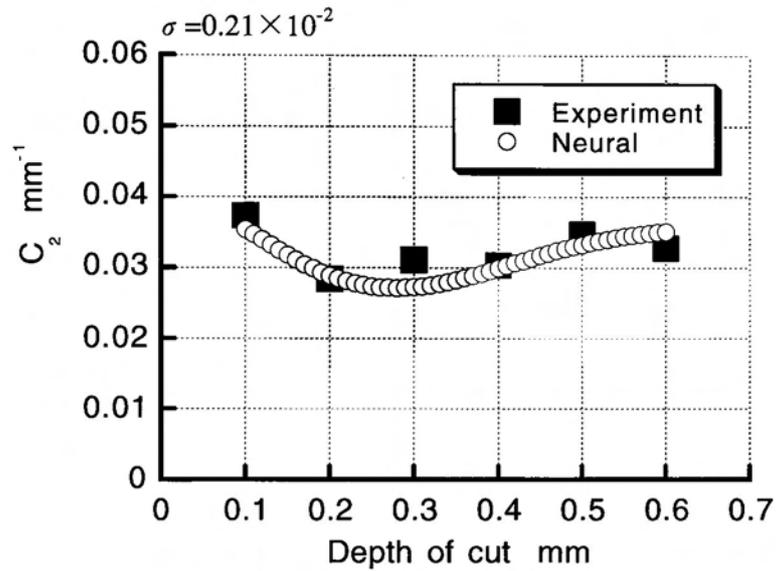


図3.15 ANNによる C_2 の推定
(切削速度=200m/min, 送り=0.1mm/rev)

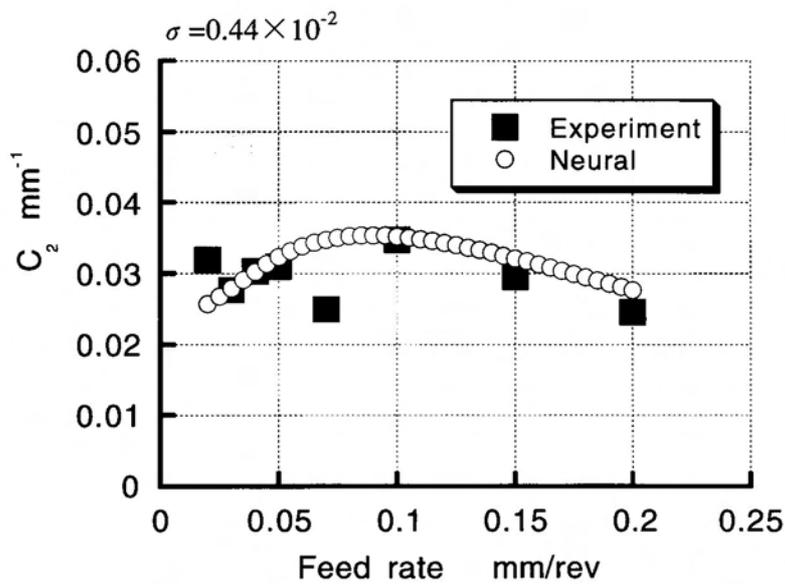


図3.16 ANNによる C_2 の推定
(切削速度=200m/min, 切込み=0.1mm)

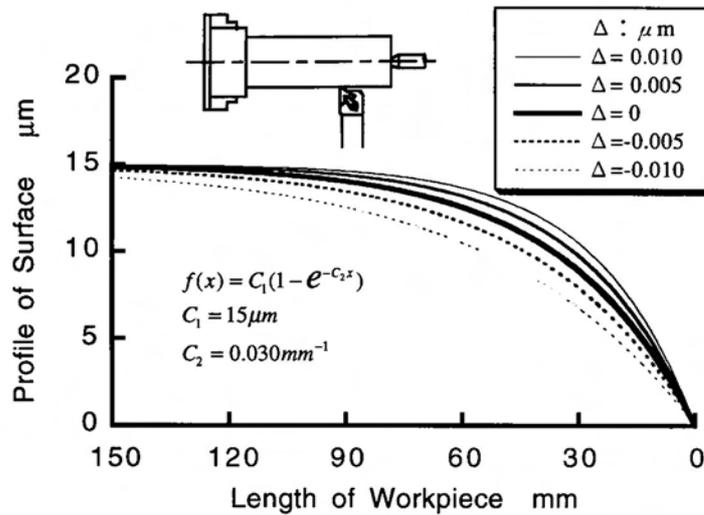


図3.17 係数 C_2 の加工誤差への影響

図3.15, 図3.16に C_2 について推定を行ったものを示す。 C_1 の場合と同様に図中にはANNの推定値と元のデータベースの値との標準偏差を示すが、 C_1 の場合と違い C_2 は加工誤差近似関数での加工誤差の応答（初期の傾き）を表す係数であるので、標準偏差の数値では一概に比較することができない。

そこで、ANNで推定された値を、加工誤差近似関数に代入して計算される誤差を考える。ここでは、係数 C_1 を固定したまま、係数 C_2 の違いによって加工誤差予測曲線にどれくらいの影響が出るかを調べる。図3.17に C_1 を15.0と固定し、 C_2 は0.03を基準としてとし、その変化量 $\Delta = -0.010, -0.005, 0.005, 0.010$ としたときの計算された加工誤差を示す。図より、切削距離60mm付近で比較すると Δ が負方向の場合で推定された加工誤差は、最大 $3 \mu\text{m}$ あり、正方向の $2 \mu\text{m}$ に比べ大きくなっている。 C_2 の変化量 $\Delta = 0.010$ は、図3.16中の送り 0.07mm/rev の場合であり、推定誤差の一番大きな箇所であるが、加工誤差の推定は $2 \mu\text{m}$ となっておりこの推定値は実用性のあるデータといえる。

3.3.4 補正加工実験

推定された係数 C_1, C_2 を用いて、補正加工を行う。元のデータベースに存在しない

加工条件を ANN に入力し、出力された係数 C_1 、 C_2 によって加工誤差予測曲線を構築し加工誤差補正用 NC 命令を作成、NC 加工を行う。

加工条件は次の 2 条件である。

加工条件①

切削速度：250m/min

送り：0.01mm/rev

切り込み：0.2mm

ANN の係数推定値

$C_1=24.23$

$C_2=0.047$

加工条件②

切削速度：200m/min

送り：0.01mm/rev

切り込み：0.5mm

ANN の係数推定値

$C_1=15.54$

$C_2=0.043$

補正結果を図 3.18, 19 に示す。グラフは、横軸に切削開始点（センタ側）からの距離を右より描いており、縦軸は加工後の工作物断面曲線で上部が工作物側を表している。縦軸の 0 点を切削開始点つまり加工誤差 $0 \mu\text{m}$ としており、切削の進行に伴って工作物径が減少していることを表している。図からわかるように、それぞれ $24 \mu\text{m}$,

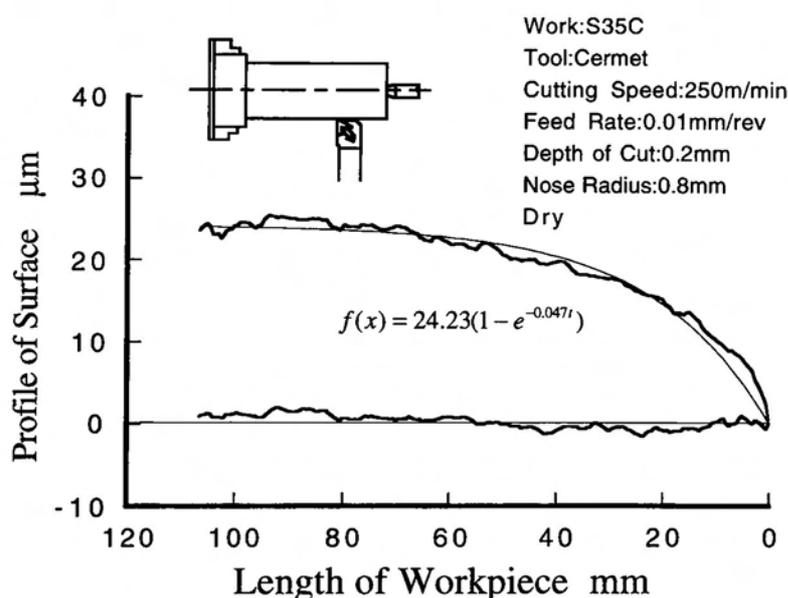


図3.18 ANNによる補正結果（加工条件①）

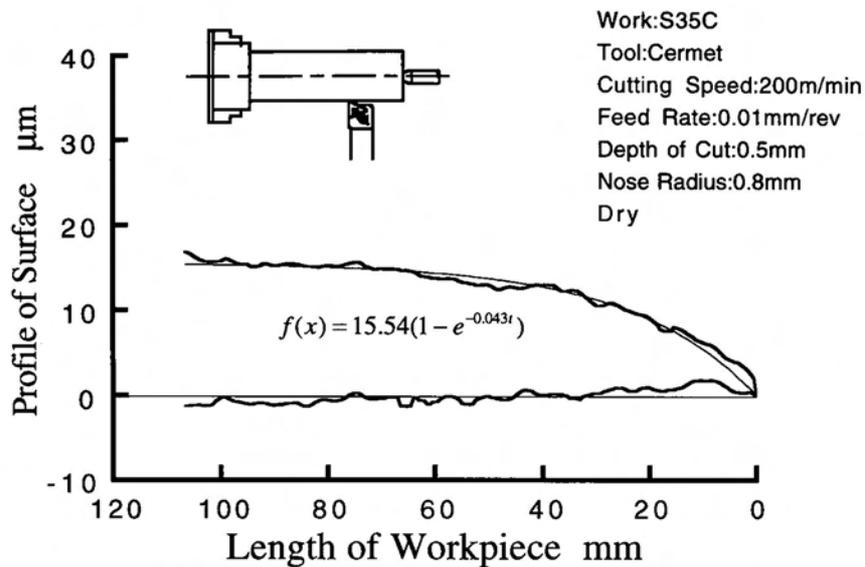


図3.19 ANNによる補正結果（加工条件②）

16 μm あった加工誤差を， $\pm 2 \mu\text{m}$ 程度に抑えることができた。

3.4 第3章のまとめ

本章では，旋削加工中に起こりうる加工精度をオンマシンで補償するために，CNC旋盤の最小設定単位（1 μm ）を利用した予測制御方式による加工誤差補正を試みた。ここでは，円筒の外周旋削加工に適用し以下の結果を得た。

(1) 旋削加工誤差を，2つの係数を使った簡単な指数関数で表現した。また，この係数は予め旋削実験を行いデータベースとして蓄えておくが，全ての加工条件に対してデータベースを用意しておくのは不可能である。そこで，データベースに存在しない加工条件については，元のデータベースの存在する範囲内で人工ニューラルネットワークを用いてその推定を行い，CNC旋盤の最小設定単位近傍でその推定が可能であった。

(2) CNC旋盤において，最小設定単位である1 μm ごとの指令に対しても，刃物台の移動，切削ともに確実に行われていることが確認できた。これによってオンマシンで加工誤差を補正することが可能であることを示した。

(3) 旋削加工誤差のデータベースを基に $1\ \mu\text{m}$ ごとに修正されたNC命令により、切削し、図3.18, 19に示す条件で最大 $25\ \mu\text{m}$ あった加工誤差が $2\ \mu\text{m}$ 以内に補正され、CNC旋盤の最小設定単位に近い加工精度に旋削できる可能性を示した。

本研究で、NC命令は変更するが測定装置は使用せず、予め加工誤差を予測しそれに見合うだけNC命令を修正するオンマシンによるフィードフォワード制御方式を提案した。この補正方式は、NC命令の最小設定単位を利用しそれと同程度まで加工誤差を減少させるものであり、当初の目的を達成できた。しかし、さらに最小設定単位以下の補正に対する要求が生じるはずである。現在工具刃先を微小に変位させることの出来る構造で、圧電素子^{7~13)}(結晶方向に電界を加え分極を起こさせると、結晶は歪みあるいは応力を生ずる圧電効果¹⁴⁾を利用したもので、主に積層セラミックス材料が用いられている)を利用したものが数多く研究されている。このような補正装置を、NC旋盤の最小設定単位を利用した本システムに組み込みハイブリッド化することで、最小設定単位以上の加工誤差補正はNC命令で行い、それ以下の加工誤差については補正機構で対処出来るさらなる高精度加工が期待できる。

第3章の参考文献

- 1) 河野嗣男, 面田学, 岡崎祐一, 小沢則光, 三井公之: インプロセス計測加工精度保証の研究(第1報)-加工面基準制御加工法の原理と基礎実験-精密工学会誌, 54, 8 (1988) 1463.
- 2) 臼井英治: 現代切削理論-コンピュータ解析と予測システム-, 共立出版株式会社 (1990) 162.
- 3) D.E. ラメハート, J.L. マクレランド, PDPリサーチグループ著, 甘利監訳, 産業図書(1989)
- 4) 佐田登志夫, 井上英夫: 高能率研削 (I) 基礎編, 大河出版 (1970) 220.
- 5) 米田孝夫, 服部志保, 嘉数侑昇: ニューラルネットワークを用いた研削条件最適化に関する研究-学習データが欠落している場合の学習方法と異質データの検出方法-, 精密工学会誌, 58, 7 (1992) 1239.
- 6) 松葉育雄: ニューラルシステムによる情報処理, 昭晃堂 (1993) 69.
- 7) 竹内芳美, 坂本正史, 浅尾晃通, 中村平: 圧電素子による旋削加工精度制御-円筒形状工作物について-, 精密工学会誌, 53, 10 (1987) 1576.
- 8) J. R. Hicks, L. A. Pally & M. R. Islam : Boring goes Adaptive, Amer. Machinist, III, 17, (1967) 93.
- 9) 梅垣淳一, 河野英一: ピエゾ駆動弾性案内による微小切込み装置の試作, 昭和57年度精機学会春季大会学術講演会講演論文集 (1982) 192.
- 10) 岡崎祐一, 新野秀忠: 圧電素子を用いた微小変位工具台の開発, 昭和60年度精工学会秋季大会学術講演論文集 (1985) 573.
- 11) S. R. Patterson & E. B. Magrab : Design and Testing of a Fast Tool Servo for Diamond Turning, Prec. Engg., 7, 3,(1985)123.
- 12) E. Kouno : A Fast Response Piezoelectric Actuator for Servo Correction of Systematic Errors in Precision Machining, Annals. CIRP, 33,1,1,(1984)369.
- 13) 内田史彦, 森山茂夫: ピエゾ駆動による工具切込み量の回転角動機制御型フライ

カッティング装置, 昭和59年度精密機械学会春季大会学術講演会講演論文集(1984)

63.

14) 田中哲朗, 岡崎清一, 一ノ瀬昇共著: 圧電セラミック材料, 学献社(1978) 11.

第4章 微小切削での表面粗さ

4.1 緒言

高分解能のCNC旋盤における旋削加工において、工作機械の持つ幾何誤差や駆動機構による誤差、加工プロセスによって生じる切削力や熱による誤差、さらに環境の影響が工作機械・工具・工作物に作用し、最終的な出力となる工作物の品質を損なう。これが加工精度であり、一般に寸法精度（直径長さ、厚さなど）、形状精度（真直度、平面度、真円度、円筒度など）、表面精度（表面粗さ、うねり）に分けて考えられる¹⁾。高品位加工を行うためには、切削状態を計測し加工誤差を直接的、間接的に測定したりあるいは、加工誤差を予測して補正を加えるなどして、安定した加工が続けられるようにしなければならない。

切削加工が、数十 μm の公差の中仕上げ加工として用いられている従来のCNC旋盤では、高速用工具および被削材が加工能率や経済性の要因とはなっても、加工精度の要因となることは比較的少なくなってきた。一方、精密切削が先端技術の分野で重用

視されはじめた1960年代後半に、 μm オーダーの精度が要求されるようになった。この段階までは、従来の切削加工用工作機械は研削盤などで最終仕上げをすることが前提になっており、それほど精度の要求は厳しくなかった。しかし、近年電子部品関連技術、エネルギーや光学機器分野において高精度切削加工が研削加工に比べ技術的、経済的に有利であるとの認識が高まっている。

このような考えの基、第3章では工作物直径方向の寸法精度を対象に軟鋼の高精度加工を実現するためにフィードフォワード制御による精度制御法について述べた。ここでは、最終的に得られた精度は $2\sim 3\ \mu\text{m}$ と既に表面粗さの領域に達しており、これをCNC旋盤の最小設定単位と同等まで向上させるには、この表面粗さの改善が必要になる。

実際に、表面粗さが過大になると、

- (1) 寸法精度を損なう。
- (2) 摩擦が増す。
- (3) 摩耗が増大する。

等の問題が起こる。

しかし、適度な表面粗さは、

- (1) 接触面に柔らかさ（締めしろ）を与える。
- (2) 面の付着を防止する。
- (3) 油の保持に役立つ。
- (4) 接着・コーティングに有用である。

等の利点がある。このように表面粗さを積極的にコントロールすることで、加工物の機能を高めることが可能になるばかりでなく、機能部品としての品位を向上させ付加価値を付けることができる。

各種部品の小型軽量化が急速に進み、高精度かつ高能率な切削加工技術が要求されるようになっている。一般の旋削加工では、例えば切り込みが $0.5\sim 1.0\text{mm}$ が最も多く利用されているが、高精度加工を目指した、仕上げ切削における補正加工では、フィードバック制御、フィードフォワード制御などの補正方法に関わらず微小送りや

微小切り込みでの切削を行うことになる。このような切削条件での表面粗さの検討が必要になる。超精密切削では、単結晶ダイヤモンドを用いて無酸素銅などの特殊材料を数 μm から数 nm の切り込みで切削を行っている²⁾。井川らは³⁾、超精密旋盤を用い直線切れ刃ダイヤモンドバイトで電気めっき銅層を切削加工する際、切込み $5\mu\text{m}$ 、送り $4.7\sim 470\mu\text{m/rev}$ を極微小切削としている。また、柴田ら⁴⁾は、単結晶ダイヤモンドバイトで純度99.9999%の銅単結晶を切込み $0.3\mu\text{m}$ 、送り $10\mu\text{m/rev}$ で超精密切削としている。さらに大園⁵⁾は、ダイヤモンドバイトで無酸素銅を切込み $10\mu\text{m}$ 、送り $6.7\mu\text{m/rev}$ で切削するのを超精密加工としている。このように超精密切削の分野では、微小切削の範囲が年代と共に変化しているため明確に定義することはできない。

一般の軟鋼（炭素鋼）と超硬、サーメット等での加工では山本ら⁶⁾が工具ノーズ半径よりやや小さい程度を微小切込みとしている。大野の研究⁷⁾では、送り 0.1mm/rev 以下を小さな送りとしている。このような旋削加工において、切り込みは $0.5\sim 5.0\text{mm}$ の範囲が最も多く用いられている。微小切削の明確な定義はないが、高橋⁸⁾は実用観点から切込みが $0.05\sim 0.5\text{mm}$ の切削としている。しかし、ここで「実用的」としているのは、工具メーカーの推奨値であるが、実際の生産現場ではこの範囲を越えて切削することもある。このように、炭素鋼を市販のスローアウェイチップの組み合わせで微細な旋削加工した場合の報告は比較的少ない。

そこで本研究では、切込み 0.1mm 以下、送り 0.05mm/rev 以下を微小切削と定義する。この際高能率加工の観点から、切削速度を 200m/min から落とさずに加工条件を設定した上で表面粗さに関する実験を行い検討する。

4. 2 切削仕上げ面特性

切削仕上げ面の特性は、仕上げ面粗さ、うねり、加工変質層、残留応力などを媒介として評価し得る。被加工面の幾何学的特徴としては、一般的に、粗さは短い周期で凹凸が連続している状態であるのに対して、表面のうねりとは工作機械の回転精度あるいは振動で変動する状態である⁹⁾。JIS¹⁰⁾では、実際には粗さとうねりを区別せず、

基準の長さの中に含まれるすべての凹凸を仕上げ面粗さとしている。これらを決定する要因としては以下のものがあげられる。

(a) 定常要因

構成刃先による付着物がなく、亀裂型やむしれ型の切りくずが生成される場合でなければ、表面粗さは比較的安定しておりその評価は、断面形状の最大高さ (R_y) で行うのが簡単である。

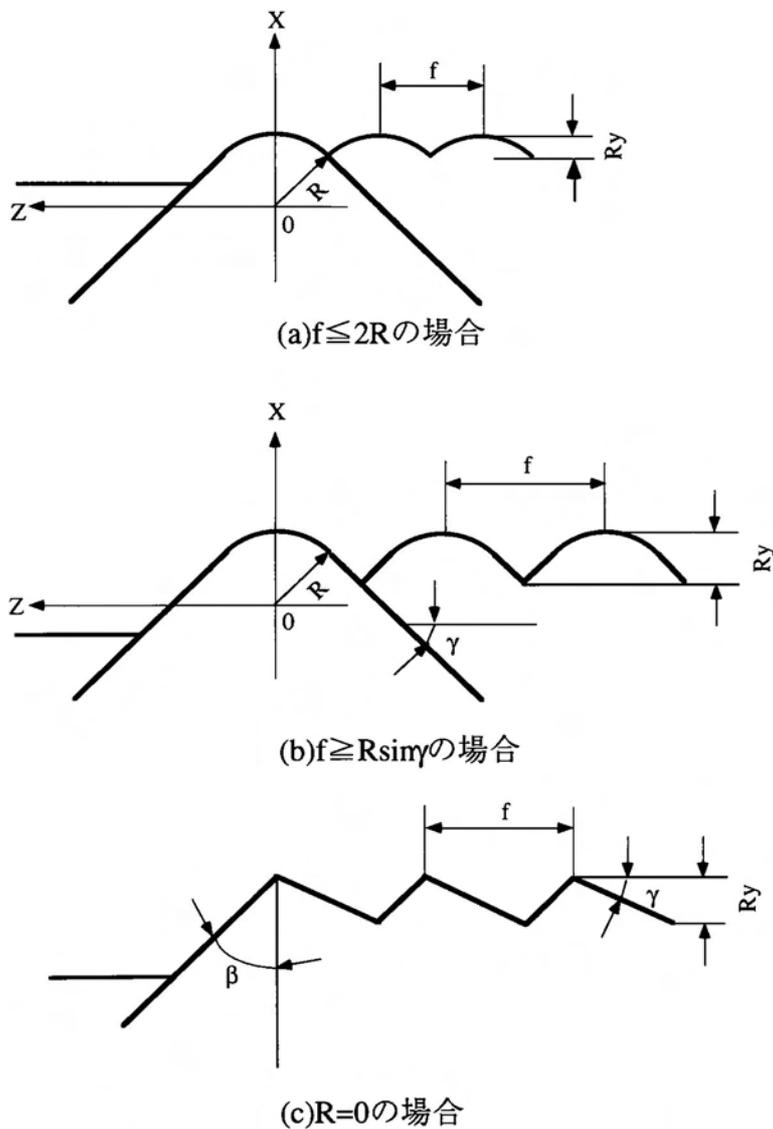


図4.1 工具切れ刃部形状と送りによる旋削仕上げ面粗さ

理論的粗さには、図 4.1 のように 3 つの代表的な形に分類される。

(1) ノーズ半径のみで仕上げ面が創成される場合：

$$R_y = R - \frac{\sqrt{4R^2 - f^2}}{2} \cong \frac{f^2}{8R} \dots\dots(4.1)$$

(2) ノーズ半径部と前切れ刃で仕上げ面が創成される場合：

$$R_y = R(1 - \cos \gamma + T \cos \gamma - \sin \gamma \sqrt{2T - T^2}) \dots\dots(4.2)$$

$$T \cong \frac{f}{R} \sin \gamma$$

(3) ノーズ半径が 0 の場合：

$$R_y = f \cdot \frac{\tan \gamma \cdot \tan \beta}{\tan \gamma + \cot \beta} \dots\dots(4.3)$$

ここで、 R_y ：旋削仕上げ面あらさ（最大高さ）[mm]、 R ：切削工具のノーズ半径[mm]、 γ ：切削工具の前切れ刃角[deg]、 β ：切削工具の横切れ刃角[deg]である。

本章では、微小切削での加工条件を前提にしているため、以降、理論式として式(4.1)を用いる。

(b) 非定常要因

仕上げ面粗さの幾何式は、送り方向のあらさを規定しており、実際の加工時に形成される粗さの値はその理論的粗さよりもかなり大きくなる。その主たる要因となるものは、非定常要因とよばれ、構成刃先、工具摩耗、工作機械の誤差、切削機構等があげられる。

(1) 構成刃先

構成刃先が発生すれば、それが次第に成長して切削工具切れ刃の先端に発達するため、その分だけ設定した切削厚さよりも余分な切削が行われる。その後構成刃先は成長を続けるが、ある一定の大きさに達すると分裂を起こす。この際、構成刃先の頭部が 2 つに分裂し、続いて脱落する事が多い。1 つの分裂片は切りくずの裏面に付着して切削圏外に運び去られるが、他の分裂片は切削面に固着して残留し、やがて全体が脱

落すると過切削現象はなくなる。

(2) 工具摩耗

構成刃先が発生しない加工条件であっても、工具摩耗あるいは工具欠損等が発生すると工具切れ刃部形状が変化し、それらが工作物表面に転写され仕上げ面は理論的な形状と異なる。仕上げ面に対しては、前逃げ面部分に形成される境界摩耗の影響が大きいためである。

(3) 工作機械の誤差

同一仕様の工作機械を用いて、同一被削材を同一条件で旋削加工した場合でも、仕上げ面粗さだけでなく断面曲線の形状が異なることがある。これは、工作機械の運動精度が仕上げ面粗さに影響することを表している。佐田¹¹⁾は、旋盤の主軸振れが仕上げ面に及ぼす影響を、主軸軸受ころの寸法がそろった（相互差： $1.5\ \mu\text{m}$ ）旋盤と寸法に差のあるころ（相互差 $2.4\ \mu\text{m}$ ）を使用した旋盤でおのこの仕上げ面の断面曲線を比べた。その結果、 R_y 換算でそれぞれ $4.6\ \mu\text{m}$ 、 $6.0\sim 8.0\ \mu\text{m}$ となり、旋盤主軸の精度が仕上げ面粗さの増加に対して影響が大きくなることを報告している。

(4) 切りくず生成

不連続の切りくずが生成される場合には、切りくずの工具すくい面への滞留と滑りが繰り返されるために過切削の状態が生じたり¹²⁾、あるいは亀裂型切りくずなどの発生により仕上げ面が傷つけられて粗さは増加する。一方、連続形の切りくずが生成される場合にも、工作物の局所的なスプリングバックによると考えられる盛り上がり、あるいは切りくずが仕上げ面に接触することによる仕上げ面粗さは理論値よりも増加する¹³⁾。

4.3 切削条件の影響

4.3.1 送りの影響

表面粗さの幾何的な理論式は式(4.1)で示されるように、送りと工具ノーズ半径で決定されるが、実際の加工では様々な要因によりこの理論式に従うことは少ない。構成刃先の生成は、その原因のうち最も大きなものの1つである。送りが小さい場合に

は主に構成刃先により仕上げ面が悪化する加工条件の領域が広いが、送りが大きくなるに従って悪化の程度は減少するとしており、このとき送りに対して粗さの値が一定値を示す臨界切削速度が存在するとしている¹⁴⁾。

ここでは、工具材種にサーメット (TiN系) を用いて、工具ノーズ半径を変化させて切削実験を行い、仕上げ面粗さ R_y を計測した。また、通常の長手方向の円筒旋削では、「4.2 切削仕上げ面特性」で述べたように、非定常要素として工作機械の誤差や、CNC旋盤の幾何誤差による影響を防ぐため正面切削での実験も行った。これにより、背分力による心押し台などの変形や、切削回数の違いによるすくい面・逃げ面の変化がなく再現性のあるデータ収集が可能と考えた。

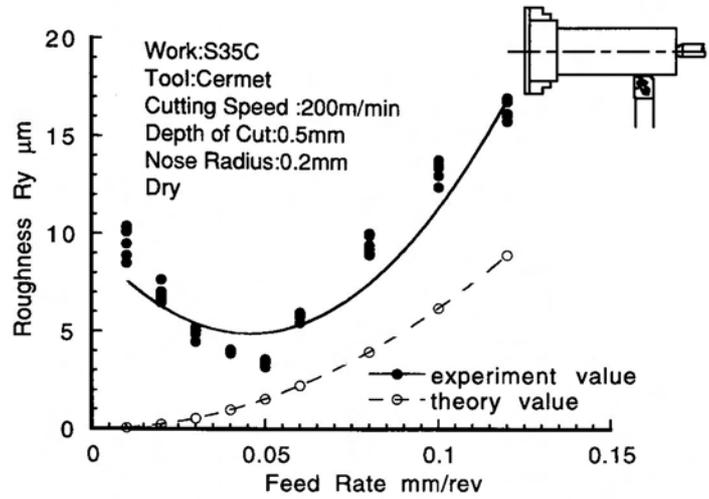
図4.2に長手切削の測定結果を、図4.3に正面切削を行った場合の測定結果を示す。各実験において測定は6回行った。表面粗さの理論式に従えば、送りを小さくするにつれて、表面粗さは小さくなるが、実際には長手切削・正面切削共に送りが 0.05mm/rev より小さくなると表面粗さは急激に悪化している。

送りが 0.05mm/rev 以下 (微小送り) の範囲では、いずれの場合も表面粗さが悪化するばかりでなく、測定値のばらつきも多くびびりも発生している。また、微小送りでは仕上げ面の送りマークがつぶされ、激しくむしれている。特に送り 0.02mm/rev 以下では、切りくずが工作物に絡み付いたり、工具すくい面上の溶着物が仕上げ面を傷つけている。

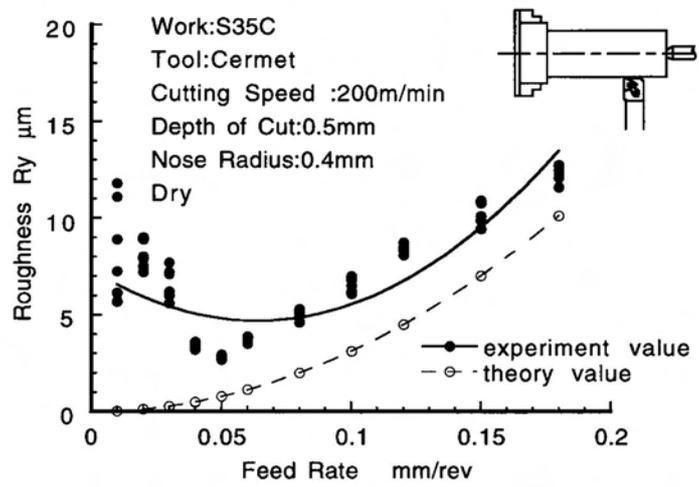
長手切削・正面切削共に、微小送りの範囲より送りを大きくすると仕上げ面に光沢があり、断面曲線にはチップ先端のノーズ形状がきれいに転写されており、表面粗さは理論式に沿うように増加してゆき、6回の測定値のばらつきもなくなっている。

ノーズ半径が違っていても表面粗さの傾向は全て同様であるが、ノーズ半径の大きな工具での切削ではより理論式に近づいている。

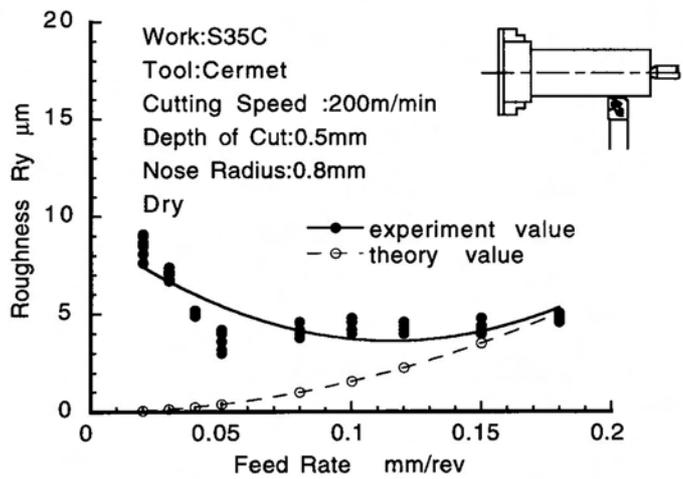
図4.4から図4.6に切削仕上げ面の写真を示す。ノーズ半径に関係なく、送り 0.01mm/rev の場合には加工面に光沢がなく、部分的に円周方向に溝状の傷が出来ている。また、仕上げ面には、構成刃先の生成と思われる脱落物が付着しているが、送りが 0.1mm/rev では、シャープな送りマークが観察できる。



(a) ノーズ半径0.2mm

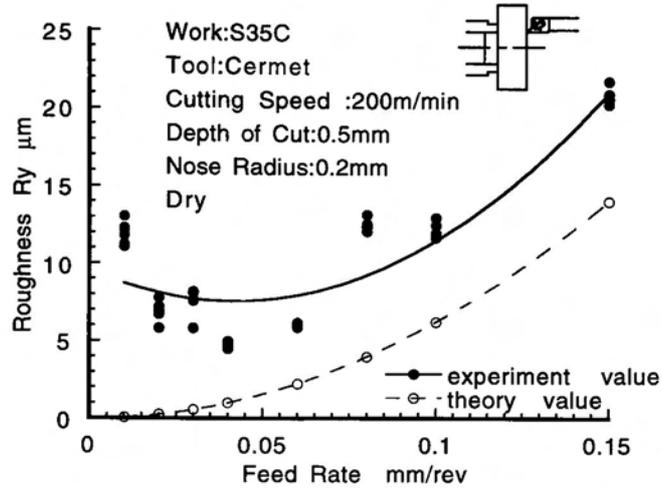


(b) ノーズ半径0.4mm

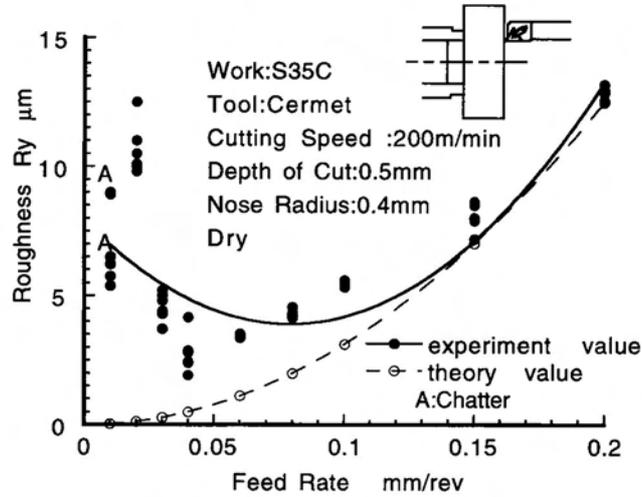


(c) ノーズ半径0.8mm

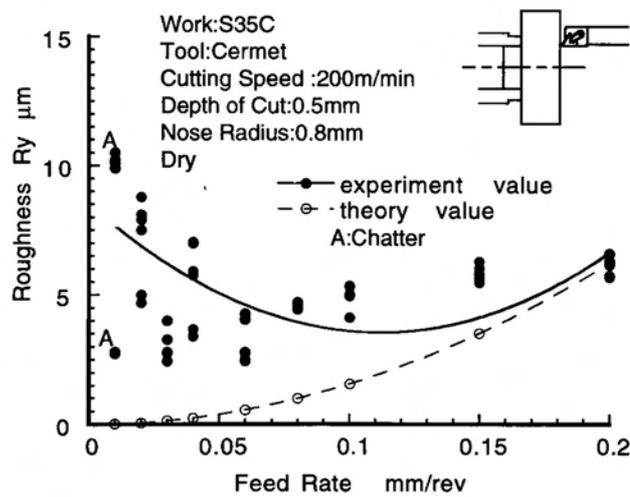
図4.2 送りと表面粗さ (長手切削)



(a)ノーズ半径0.2mm

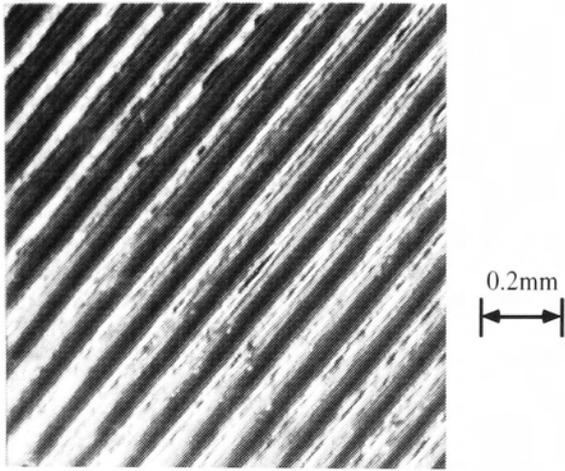


(b)ノーズ半径0.4mm

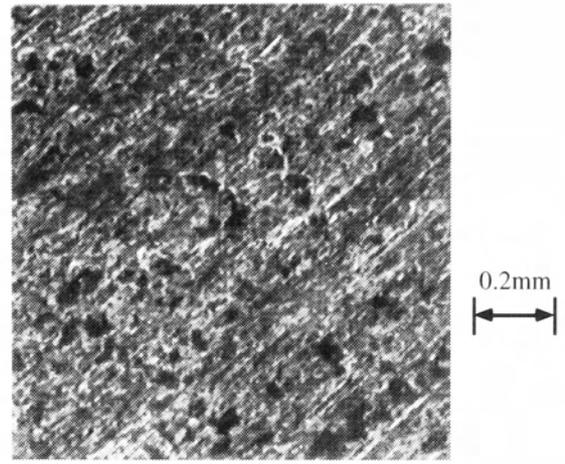


(c)ノーズ半径0.8mm

図4.3 送りと表面粗さ (正面切削)

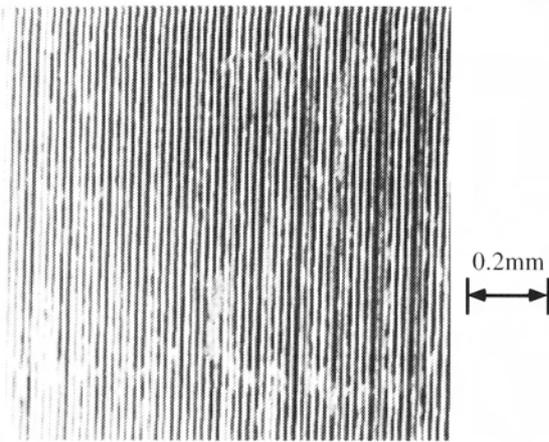


(a)送り0.1mm/rev

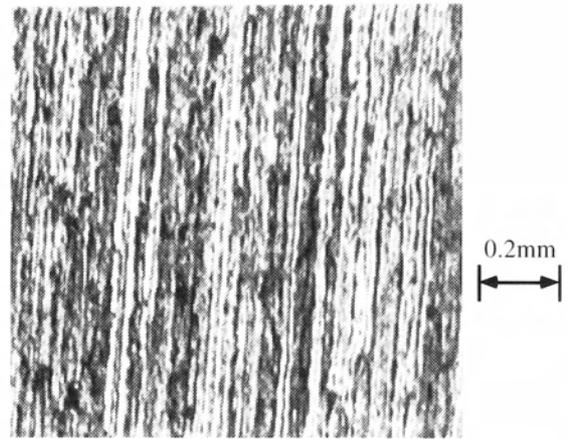


(b)送り0.01mm/rev

図4.4 旋削加工後の工作物表面（ノーズ半径0.2mm）

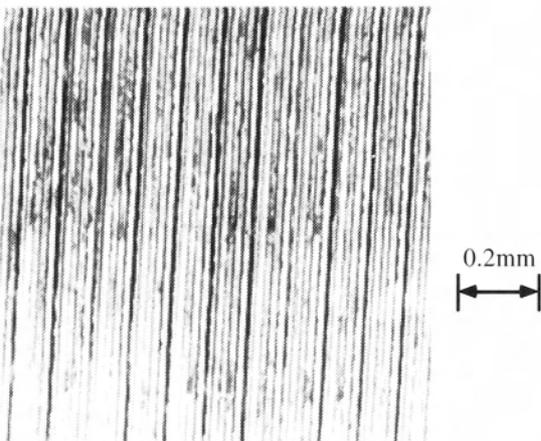


(a)送り0.1mm/rev

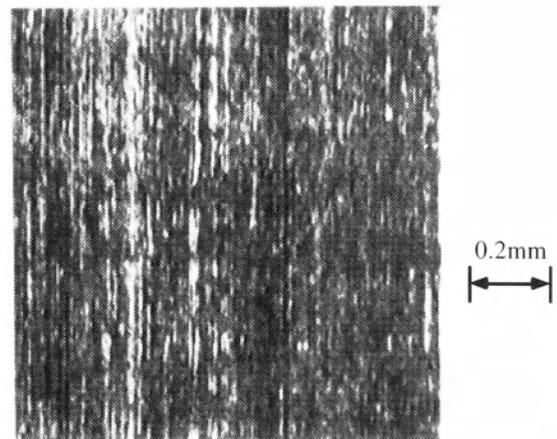


(b)送り0.01mm/rev

図4.5 旋削加工後の工作物表面（ノーズ半径0.4mm）



(a)送り0.1mm/rev



(b)送り0.01mm/rev

図4.6 旋削加工後の工作物表面（ノーズ半径0.8mm）

4.3.2 ノーズ半径の影響

ノーズ半径を大きくすれば、理論式(4.1)より計算すると表面粗さは小さくなる。しかし、「送りの影響」の実験結果からわかるように、微小送りよりも大きい範囲では概ねその値と傾向は一致するが、微小送り範囲ではその傾向さえも一致しない。理論式では、表面粗さを決定するもう一つのパラメータとして、ノーズ半径がある。ここでは、そのノーズ半径が表面粗さに与える影響について考える。

異なるノーズ半径(0.2, 0.4, 0.8mm)の工具で、 $\phi 155$ の軟鋼の円盤を用いて主軸回転数を一定にし、外周部から中心に向かって正面切削を行う。回転数一定で正面切

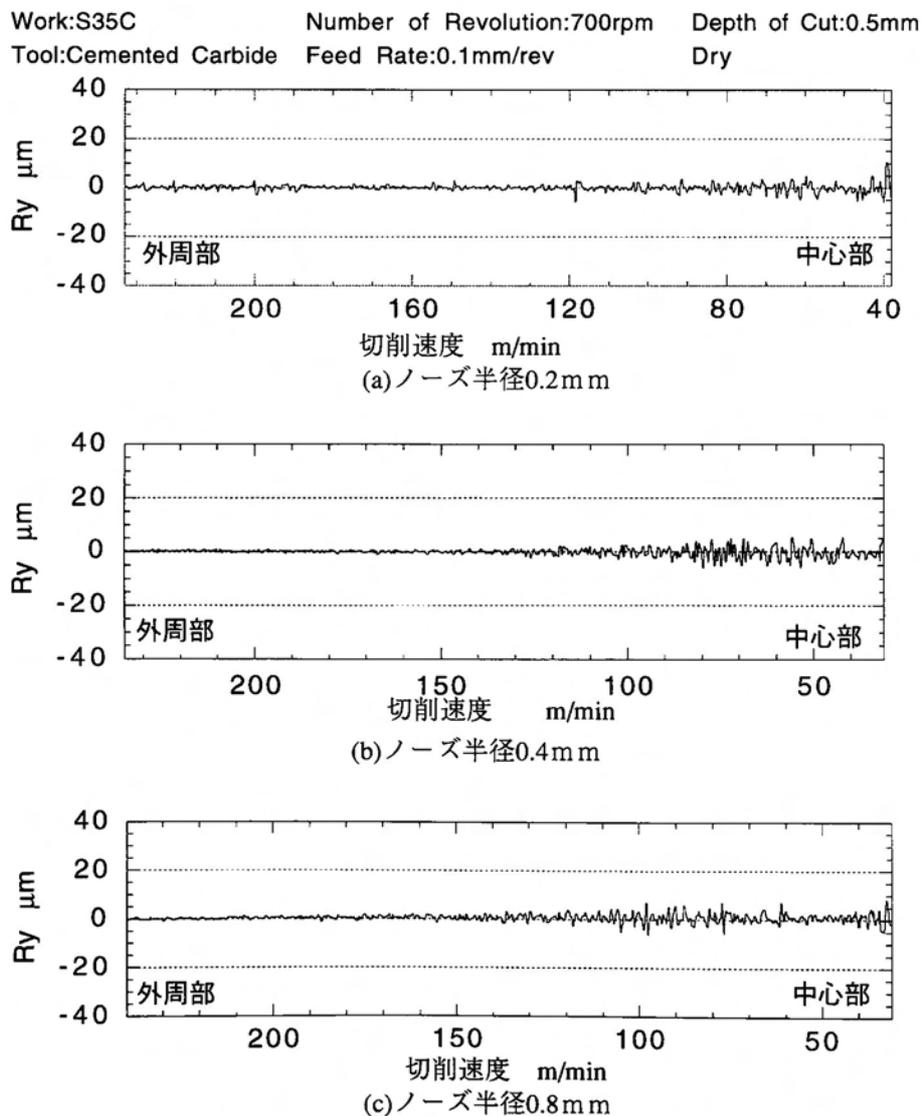


図4.7 ノーズ半径と表面粗さの関係

削を行うと、工具が中心に向かうに従って切削速度が減少し、これに伴い切削温度は下降する。さらに、中心に近づくと構成刃先の発生する領域に入り、表面粗さは著しく悪化すると考えられる。図4.7に超硬工具（P20）を用いた実験結果を示すが、図中の横軸は工具位置（X軸座標：直径位置）を切削速度に換算したものである。

どのノーズ半径においても、円盤状工作物の中心部に近づく（切削速度が減少する）につれて表面が激しくむしれ、不規則に大きく振動しその値も大きいことがわかる。これに反して、ノーズ半径が小さいほど円盤中心の表面粗さの変動が小さくなっている。この現象を比較すると、ノーズ半径0.2mmは、高速範囲ではノーズ半径0.8mmより表面粗さが大きくなるが、中心部での粗さは比較的良好で、切削速度の変動に対して表面粗さが安定な領域が広い。

この関係を見るために、図4.8にノーズ半径と切りくず厚さの幾何学的関係を示す。同一切り込み（0.2mm）では、ノーズ半径が大きいほどノーズ部で切削する割合が増加し、工作物との接触弧が大きくなる。工具切れ刃部形状（ノーズ半径）は、仕上げ面粗さを左右する重要な要因であるが、ノーズ半径が大きくなると、仕上げ面の創成に直接関わる実効切削厚さ（全切りくず面積を接触弧で割ったもの）が薄くなり、刃先付近の温度が低下し構成刃先が発生するという報告もある¹⁵⁾。切りくず厚さが薄いと

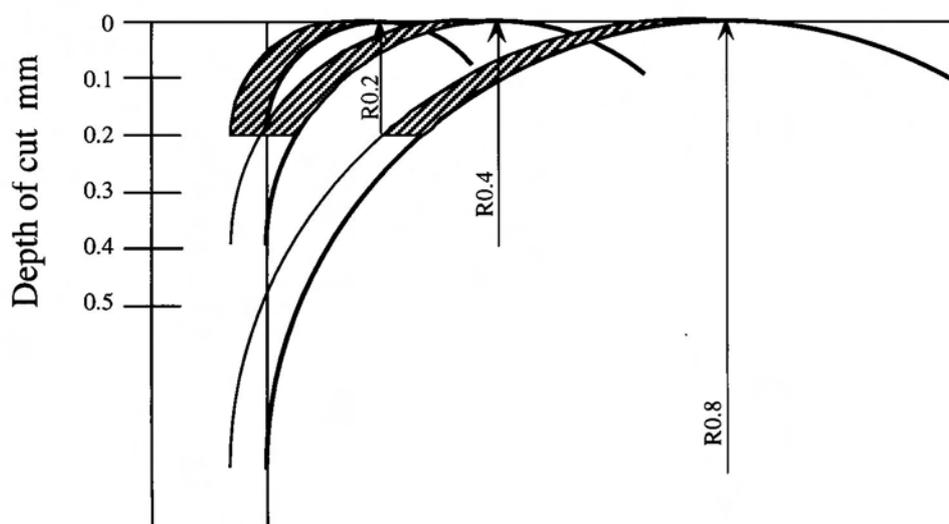


図4.8 ノーズ半径と切り屑厚さの関係

いうことは、送りが小さいということと同じ効果になり構成刃先による擾乱が増加する。また、実効切削厚さが薄くなると、工作物の弾性変形などにより被削面に削り残しの部分が出ることもありこれによっても仕上げ面が悪化する。

4.3.3 工具材種の影響

近年、サーメット、コーティッド工具 (Al_2O_3 , TiN) は、金属加工の高速化・高能率化への移行に従って年々その使用が増加し、従来から利用されてきた超硬工具と並んで、最もポピュラーな工具材種として広く普及している。また、その適用範囲も仕上げ・軽切削から荒加工にまで広がっている。表面粗さの理論式は、工具ノーズ半径と送りによって決定される。しかし、実際の旋削加工では、工具材料と工作物材料間の物理的、化学的相互作用、加工プロセスの動特性、工具刃先の微細形状などが複雑に絡み合って切削面は形成される。

ここでは、工具材種が表面粗さに与える影響を調べるために「ノーズ半径の影響」の実験と同様に、主軸回転数を一定にした、 $\phi 115$ の円盤状工作物をサーメット、コーティッド工具、超硬工具の3種類で切削速度を変化させて正面切削を行った。

図4.9に工具材種を変えて外周部から内周部に向けて正面切削を行った時の、工具移動方向の断面曲線を示す。図からわかるように、サーメットは、他の工具材種に比べ高切削速度領域において良好な表面粗さを示し、その有効範囲も広い。以下に、各工具材種の特徴を記す。

(a) 超硬合金

WC, TiC, TaC, Coなどの原料粉末を混合、粉碎した後、所定の形状・寸法に応じた金型を用いて加圧、成形したものを真空炉中にて $1350\sim 1500^\circ\text{C}$ で焼結する粉末冶金法によって作成される。WC, Co以外のTiC, TaC, NbCなどの添加量や硬質粒子の粒子径によってその性質は様々である。靱性が高くより大きな送りに耐えられるものと、耐摩耗性、耐熱性があり高速切削に耐えられるものがある。

(b) コーティッド工具

コーティッド工具は、超硬合金を母材に、その表面に数 μm の厚さの炭化物、窒化

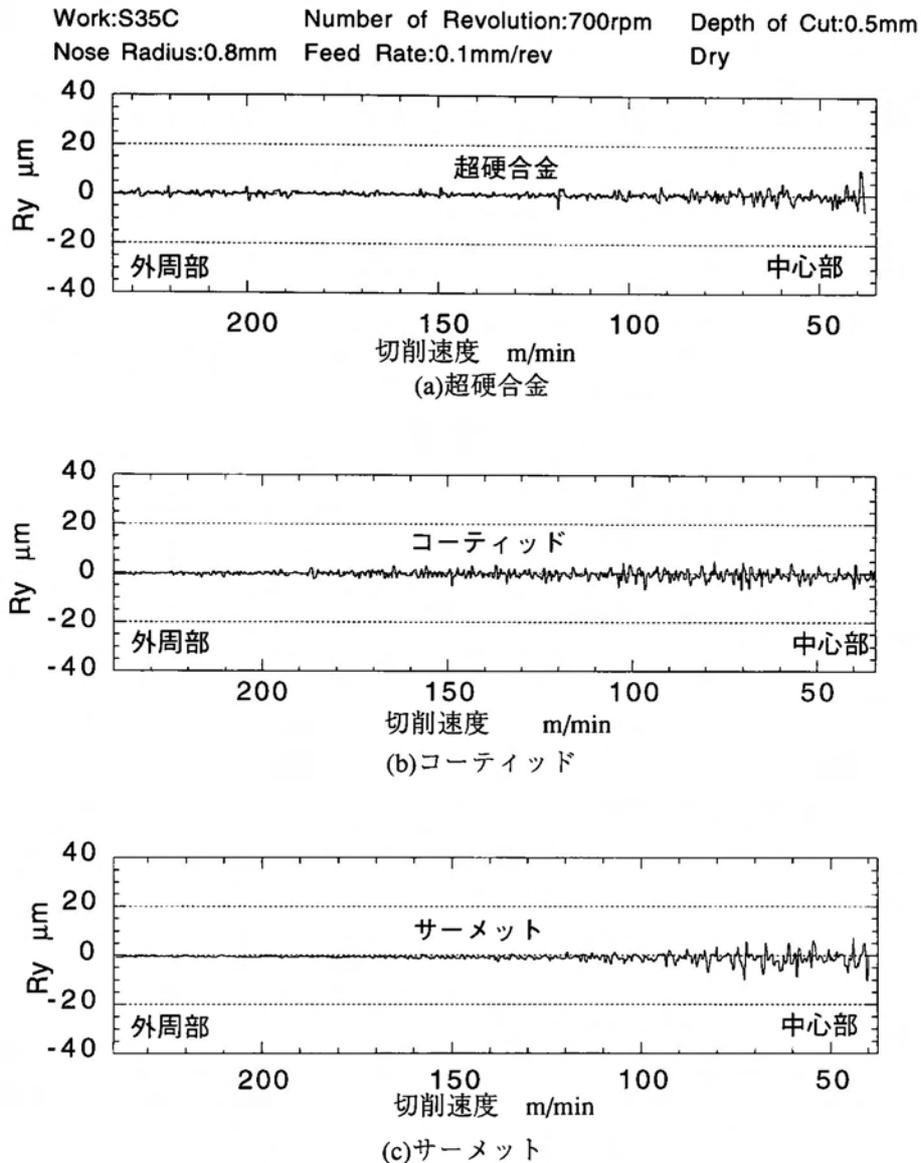


図4.9 工具材種と表面粗さの関係

物、酸化物などのセラミックスの薄膜を被覆した被覆超硬合金である。母材である超硬合金の強靱性と、表面物質であるセラミックスの耐摩耗性、耐酸化性、耐焼き付き性などを併せ持つ。今回実験に用いた Al_2O_3 被膜は、クレータ摩耗、フランク摩耗共に高速領域において少ないことから、図4.9(c)に示すように高速切削に適する。しかし、一度被膜が剥がれるとその効果が急激に下がってしまう。

(c) サーメット

サーメット (cermet) は ceramic+metal, すなわちセラミックと金属からなる複合材料を意味する造語である。切削工具の世界では、特に超硬合金の主成分である WC を

TiCやTiNで置換したものをサーメットと呼んでいる。TiCやTiNはWCに比べ高速での耐摩耗性に優れ、鋼との反応も少ないという特徴をもつものの韌性や熱衝撃では若干劣っている。そのため仕上げ切削や、比較的負荷の少ない軽切削に適している。切削性能において、サーメットがコーティングに比べ最も優れている点は、耐摩耗性と仕上げ面の品位の良さである。これは、コーティッド工具が、超硬合金の表面にセラミックス等のごく薄い薄膜を被覆した複合材料であるため、摩耗の進行に伴って、コーティング膜の剥離が生じ、仕上げ面を荒らすのに対し、サーメットは単一材料であるためである。さらに、コーティッド工具に比べ、CVD（Chemical Vapor Deposition：化学蒸着法）やPVD（Physical Vapor Deposition：物理蒸着法）等のコーティング工程が不要なため安価であることから、その使用比率はコーティッド工具にまさる勢いで急増している。

以上のことより、鋼の旋削加工での微小切削範囲では、サーメット工具は良好な結果を示すことがわかる。そこで、サーメット工具を用いてノーズ半径を変化させて前述と同様の実験を行ったものを図4.10に示す。

図より、ノーズ半径によらず切削速度が減少して行くと構成刃先によると思われる表面粗さの悪化が認められる。

4.3.4 切り込みの影響

精密加工や超精密加工の分野では、仕上げ加工を微小切り込みによる切削加工で行うのが一般的である。「第3章」では、通常の工具による軟鋼の旋削加工において、オンマシンでNC命令補正により切り込みを制御し、加工誤差を補償する必要性とその効果を示した。切り込みの仕上げ面粗さに及ぼす影響については、切り込みの増加に伴わずかに増加するが、その影響はほとんど見られないとした研究報告¹⁶⁾があるが、これらの送りの下限は0.1mm/rev程度で、本研究で扱っている微小切り込みの範囲を対象としたものではない。微小切り込みの場合には、送りが小さい場合やノーズ半径が大きい場合と同じように工具先端のノーズ半径部のみで切削を行うことになり、通常の切削条件での加工とは様子が違ってくるはずである。

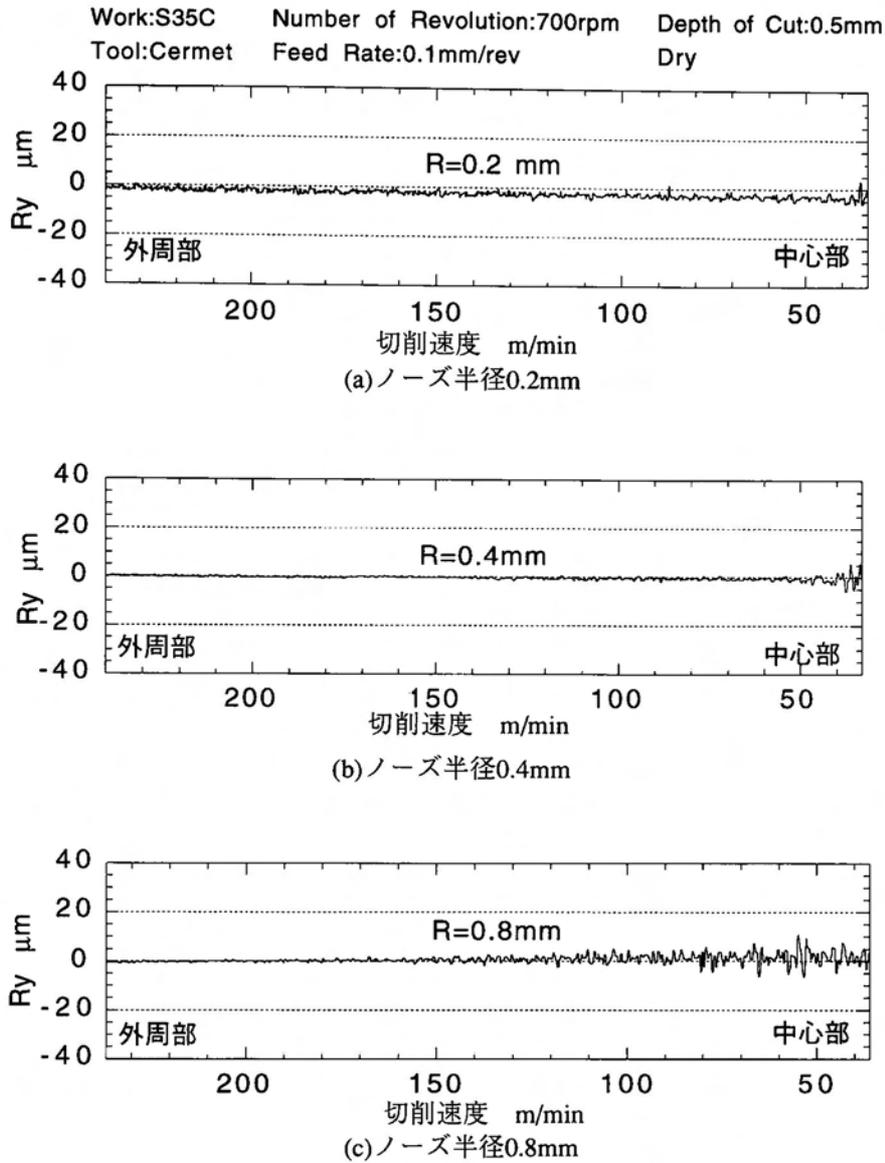


図4.10 ノーズ半径と表面粗さの関係

ここでは、切り込みの影響を見るために、炭素鋼をノーズ半径を変えた3種類のスローアウェイチップで長手方向に旋削加工を行い仕上げ面粗さへの影響を調べた。

図4.11に実験結果を示す。表面粗さの理論式では、切り込みの影響はないが、図より切り込みを変化させた場合には、その影響を受けている。特に微小切り込みの範囲では、切り込みを小さくするとある点を境に表面粗さは悪化している。

ノーズ半径により、それぞれの切り込みでの表面粗さの最小限界値となる境界が異なる。ノーズ半径0.2, 0.4, 0.8mmの切り込みの最小限界値は0.1, 0.2, 0.4mmとなっ

ており、ノーズ半径が小さいほどその最小限界値は小さくなっており、おおよそノーズ半径の半分の値になっている。このことより、炭素鋼の乾式切削では、切り込みをノーズ半径の半分の値にすれば、最良の仕上げ面が得られる。

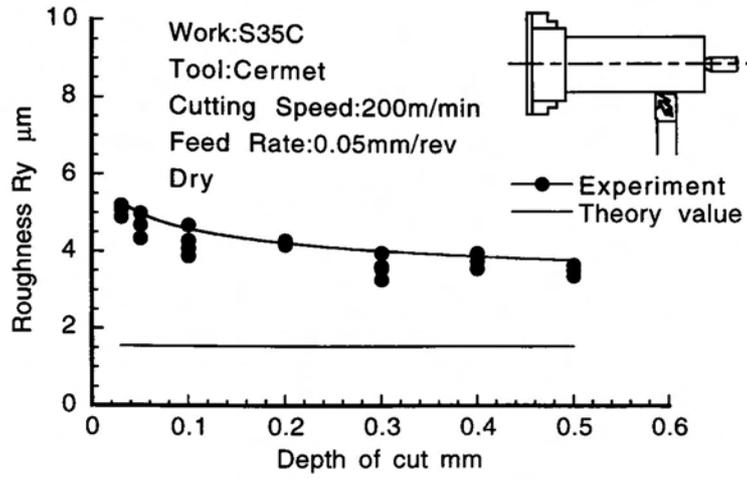
切り込みが限界値よりも小さい場合に表面粗さが悪化する原因を調べるために、違った切り込みで旋削加工を行った後の工作物表面を CCD カメラを使用して観察した。写真の番号に対応する加工条件は表 4.1 に示す通りで、それぞれの表面写真を図 4.12, 図 4.13, 図 4.14 に示す。

写真より、図 4.12(b), 図 4.13(b), 図 4.14(b)の場合、切削した工作物表面に金属光沢がなく、微小送りと同様に工作物表面に黒い点の溶着物が付着したり、表面がむしれている。これに反し図 4.12(a), 図 4.13(a), 図 4.14(a)では、工作部表面に送りマークがはっきりと転写され、金属光沢がありきれいな表面になっている。

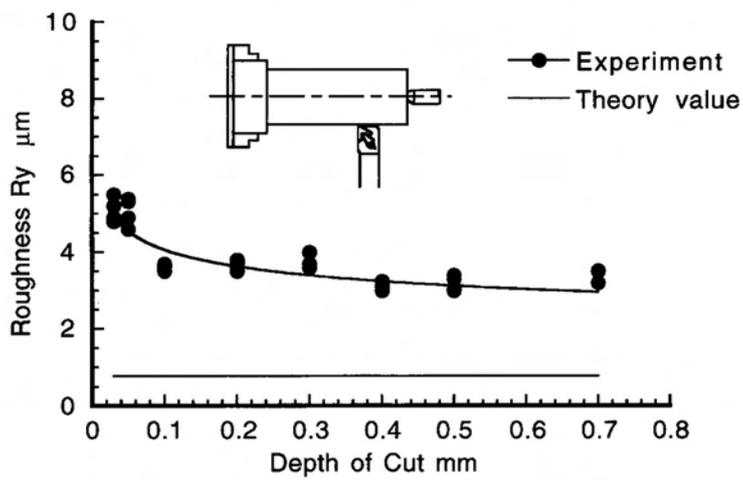
切り込みによる仕上げ面粗さの影響を調べる際、使用したスローアウェイチップは全て未使用のものであった。「第2章 オンマシンによる旋削加工誤差測定」で述べたように、旋削加工の進行に伴って工具逃げ面は摩耗し、切り込み方向の工具が後退することを検証した。微小切り込みでは、切りくず厚さが小さくなることが構成刃先の生成に寄与することから、工具摩耗についても同様のことが考えられる。

次に、初期摩耗を終え定常摩耗領域（切削距離：30,000m）に入った工具と未使用の工具で同一条件の切削実験を行いそのときの表面粗さを測定したものを図4.15に示す。切削実験は各条件で3回行い、グラフには全てのデータを記しているがそのばらつきはほとんどなく、非常に再現性が良く信頼性のあるデータといえる。未使用のチップと定常摩耗領域に入ったチップとでは、表面粗さの値が倍ほど違う。

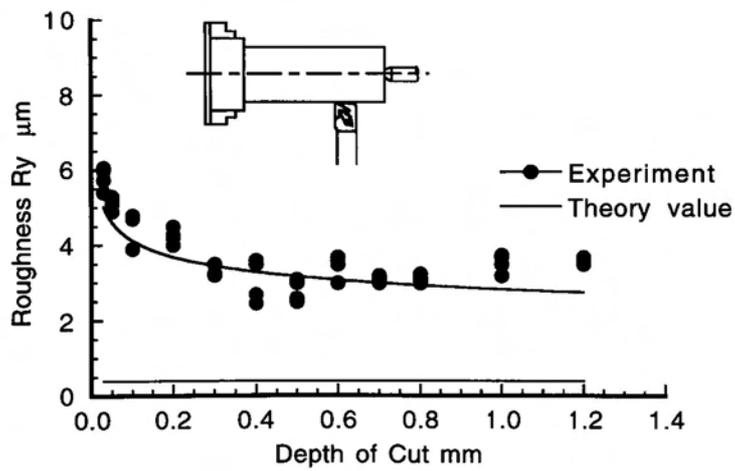
旋削加工では、1つの製品を加工するのに多くの時間を必要としないので、その間の工具摩耗の進行はないものと考えられる。また、定常摩耗領域に入った工具での切り込みの変化に対する表面粗さの傾向は、未使用の工具と一致している。このことから切削した距離により、工具を管理し用途によって使い分ける、例えば仕上げ加工用に未使用の工具を、荒加工用には一度使用した工具をそれぞれ使い分ければ、仕上げ面粗さの向上に役立つ。



(a)ノーズ半径0.2mm



(b)ノーズ半径0.4mm

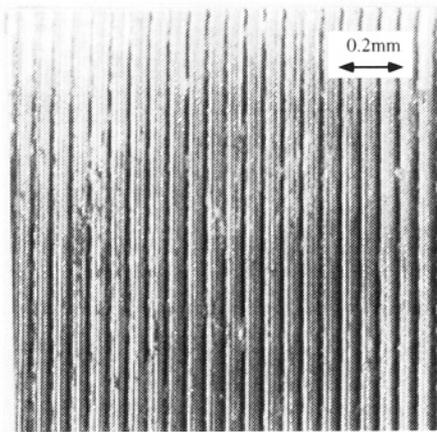


(c)ノーズ半径0.8mm

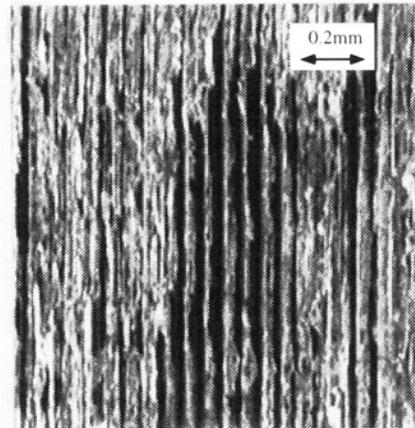
図4.11 切込みと仕上げ面粗さの関係

表4.1 工作物表面の写真番号

図番		加工条件		
		切込み	ノーズ半径	その他の加工条件
図4.12	(a)	0.5mm	0.2mm	工作物：S35C 工具：サーメット 切削速度：200m/min 送り：0.05mm/rev 乾式切削
	(b)	0.03mm		
図4.13	(a)	0.7mm	0.4mm	
	(b)	0.03mm		
図4.14	(a)	0.5mm	0.8mm	
	(b)	0.03mm		

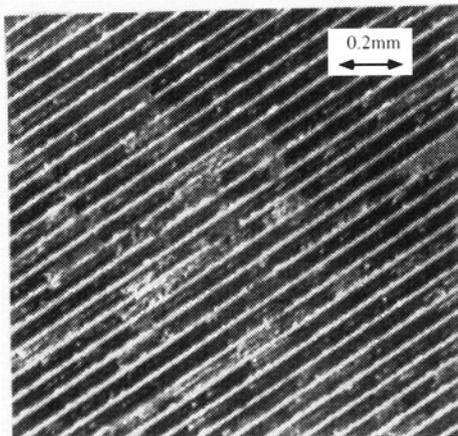


(a)切り込み0.5mm

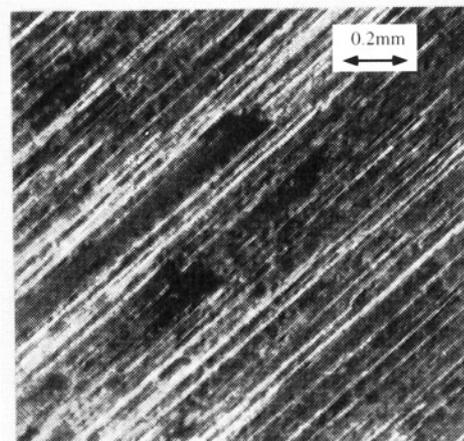


(b)切り込み0.03mm

図4.12 旋削加工後の工作物表面



(a)切り込み0.5mm



(b)切り込み0.03mm

図4.13 旋削加工後の工作物表面

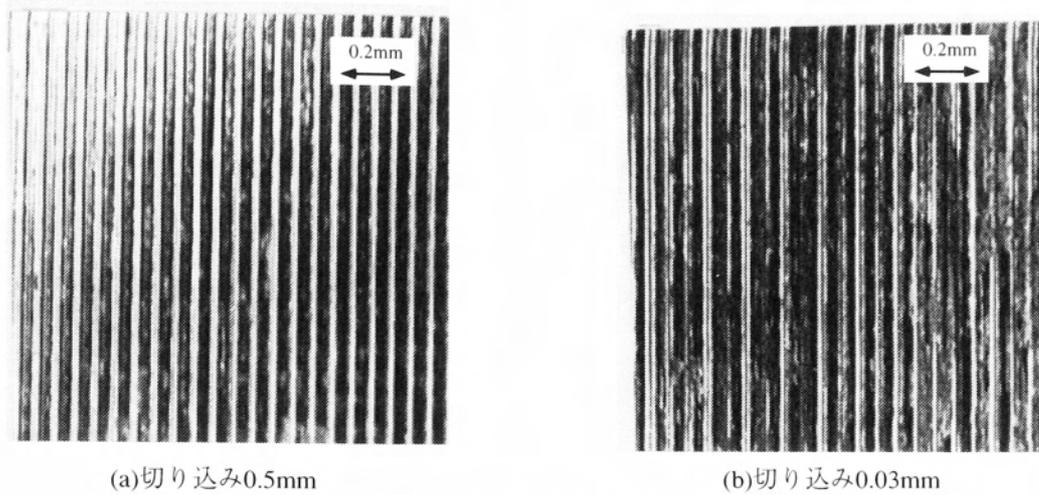


図4.14 旋削加工後の工作物表面

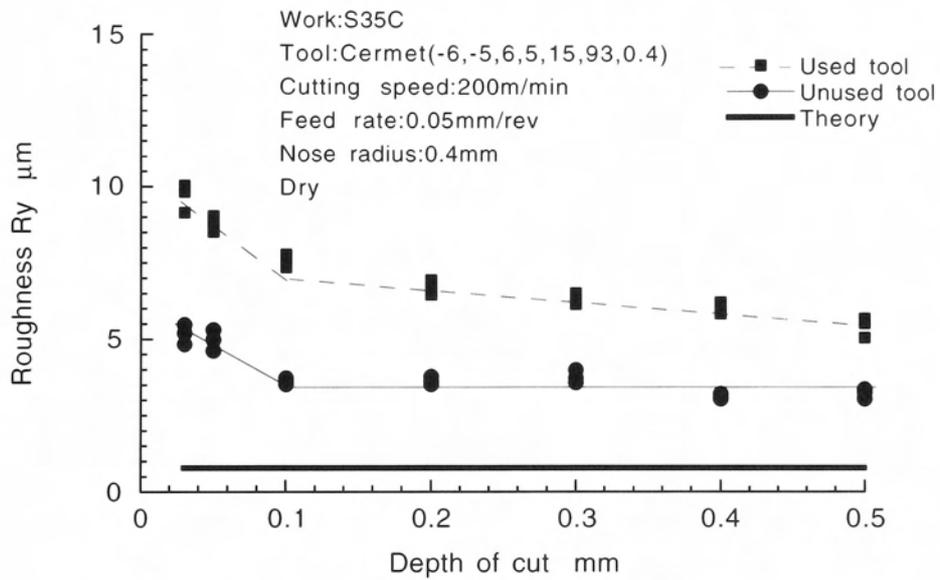


図4.15 新旧工具による表面粗さ

4.4 仕上げ面の改善

4.4.1 切削油剤の利用

前述の実験結果より、微小送り、微小切り込みの範囲で表面粗さが悪化する主な原因は構成刃先と考えられる。しかし、加工誤差を抑制するための最終仕上げ加工の補

正加工では、微小送り、微小切り込みで切削加工を行う必要がでてくる。従って微小切削の範囲で、良好な仕上げ面を得るために、何らかの対策をとる必要がある。

構成刃先の発生を防ぐための方法としては、切削速度の増大、切り込みの増加、送りの増加、すくい角の減少によって刃先温度を上げ、被削材が加工硬化しないようにするか、逆にすくい角を大きくしたり切削油剤を用いたりして、被削材の溶着を防ぐなどがある¹⁷⁾。このように、構成刃先は、切削温度が切りくずの再結晶温度（軟鋼では、500～600℃程度）以上に達したときに消失するが、これは切りくずの加工硬化性が失われるためであり、被削材種の脆性、切り込み、送りやその他の条件によって支配される。

本研究の実験結果から、乾式切削で2～3 μmの仕上げ面粗さの限界値が得られた。送りが0.01～0.03mm/revの範囲では、切削速度を大きくしなければ構成刃先の消失領域に達することは出来ない。しかし、最小設定単位が1 μmという通常のカNC旋盤では、最大回転数が2000～3000rpmとなっておりφ50の材料では切削速度を300m/min以上にすることは無理である。逆に構成刃先が発生しない、切削温度の極端に低い切削速度領域で加工を行えば、主軸回転数が低下しそれに伴い加工時間が長くなるため加工能率が落ち実用的ではない。また、難削材を高温に加熱して軟化させ、一方、工具の方はなるべく低温で硬い状態に保ち、両者の機械的性質の差が大きくなることを利用して切削加工を行い、加工能率を高めようとした高温切削の研究¹⁸⁾もある。これは、工作物の加熱による軟化、延性の向上によるもので、構成刃先を生じやすい工作物では、切削形態が流れ形に近づきこれが消滅することが報告されている。しかし、これらは、耐熱性の良い超合金工具が開発され一般的に使われだしたことや、装置自体が大がかりであること、さらには切削工具の温度上昇に対する処理が十分でないため加工精度の低下や工具寿命の短縮を招き実験段階から抜け出すことが出来ず実用化には至っていない。

ここでは、微小送り、微小切り込み領域での構成刃先の防止によって仕上げ面の改善を行うために切削油剤を用いる。一般的に切削油剤には、冷却・潤滑・洗浄効果が期待できるが、切削仕上げ面粗さに及ぼす効果としては特に潤滑効果と冷却効果があ

る。すくい面を潤滑できれば金属接触が妨げられ構成刃先は発生しにくくなる。その際、切削油剤の冷却効果によりさらに温度は下がり構成刃先が発生しにくくなり切削仕上げ面は良くなる。高速切削領域（200m/min）では、切削油剤特に不水溶性切削油がすくい面に侵入することはほとんど期待できず潤滑作用による効果は望めない。水溶性切削油は、潤滑効果よりも冷却効果が大きく、切れ刃や工具を十分に冷却することができるが、そのため切りくずが再結晶温度付近にまで下げられ、構成刃先が成長する領域に入ってしまう¹⁹⁾。このようなことが起こりうるが、実際には切りくずの処理性や加工精度の点から水溶性切削油剤による湿式切削が有効であると考えられる。特に今回の実験では、微小切削領域での切りくず厚さの減少による構成刃先の発生を抑えるために、高速切削でも潤滑効果が期待出来る²⁰⁾ 水溶性切削油剤 W2 種 -1²¹⁾（ソリューブル形）を使用する。

図 4.16, 17, 18 にノーズ半径 0.2, 0.4, 0.8mm で乾式切削と湿式切削における送りを変化させたときの表面粗さの比較を示す。実験結果により、仕上げ面粗さの傾向（送りが小さくなると表面粗さは減少する）はノーズ半径に関係なく理論値と一致し、表面粗さも $1.3 \mu\text{m}$ まで改善することができた。これらは、乾式切削の状態では微小送り切削を行ったときには、切りくずが工作物に絡み付き、仕上げ面に損傷を与えていたが、切削油剤を用いた湿式切削では切りくずがつかず短く切れており排出具合が良くなったことなどに起因する。湿式切削で送りが 0.03mm/rev を越えると、表面粗さは乾式切削の場合と、表面粗さが乾式切削で得られた仕上げ面粗さの傾向と一致しその値も乾式切削での場合とほぼ等しくなっている。

湿式切削における微小送り範囲では、乾式切削で表面粗さが悪化する主な原因の構成刃先が切削油剤の冷却効果、潤滑効果、洗浄効果としての切りくず処理効果等の作用により、発生しなくなり良好な値を得ることが出来た。

以上の事柄は、図 4.19, 20 の湿式切削後の工作物表面の写真からもわかる。微小送り範囲（ 0.01mm/rev ）の時いずれの場合においても工作物表面に均一な送りマークが明瞭に見られ、構成刃先の付着物が存在しない。しかし、図中のノーズ半径 0.8mm の測定値はノーズ半径 0.2, 0.4mm の場合と若干様子が変わってくる。図 4.18 に示すよう

に、ノーズ半径0.8mmの場合には送り0.05mm/rev以下では測定された表面粗さのデータにかなりのばらつきがある。「図4.8 ノーズ半径と切りくず厚さの関係」で述べたように、仕上げ面粗さの創成に直接影響する刃先先端部分の実効切削厚さは、ノーズ半径の増加に伴って薄くなり、これにより削り残しが起こる。ノーズ半径0.8mmの場合

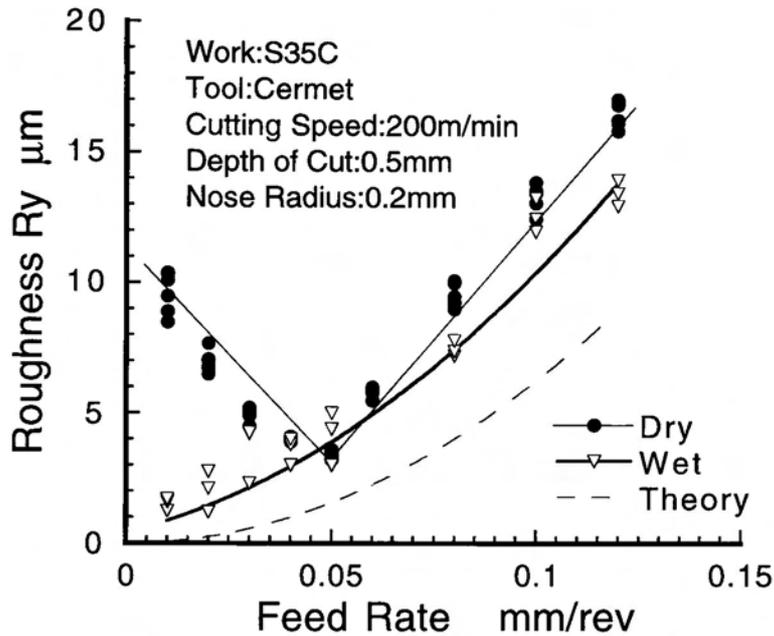


図4.16 送りと表面粗さ (ノーズ半径0.2mm)

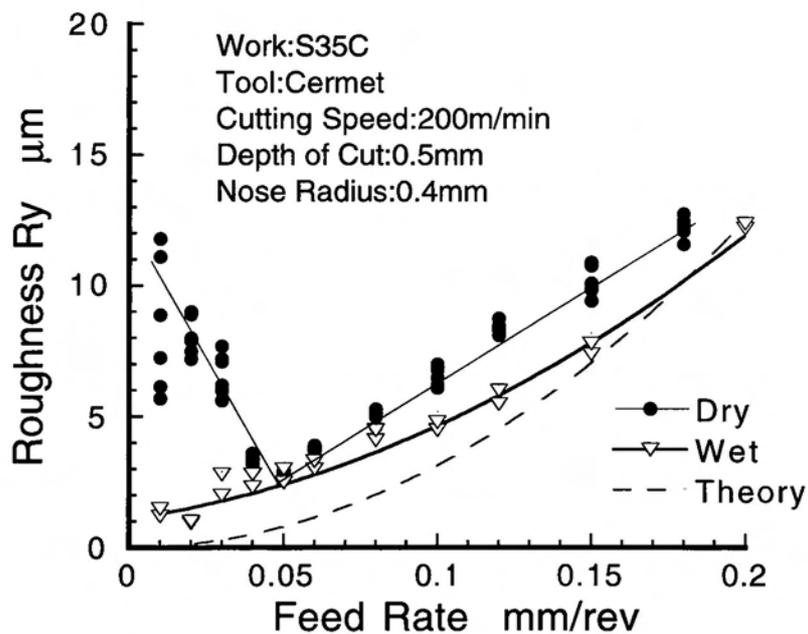


図4.17 送りと表面粗さ (ノーズ半径0.4mm)

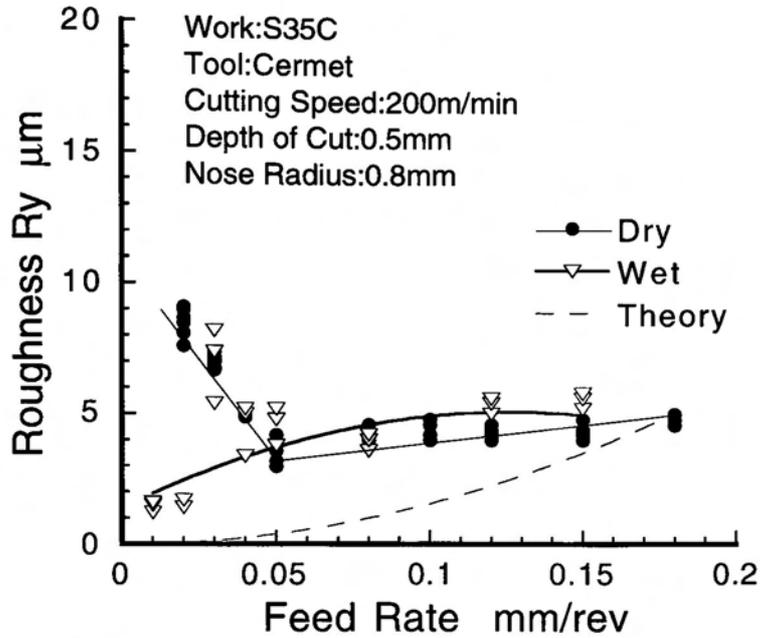
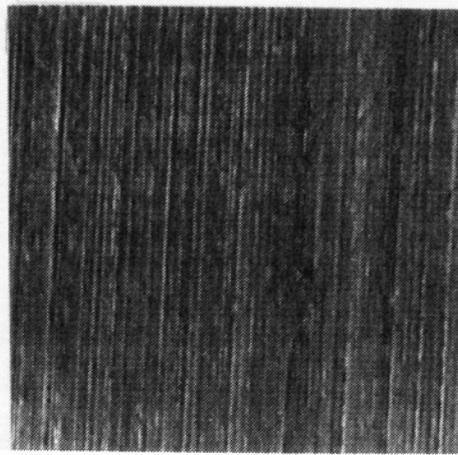


図4.18 送りと表面粗さ（ノーズ半径0.8mm）

のように切り込みや送りに比べてノーズ半径が大きい場合の表面粗さの悪化は、構成刃先のみの影響ではないため、切削油剤の効果がノーズ半径が小さい時ほど顕著には現れない。また、大野の研究によれば²²⁾、前切れ刃角が大きくなるとなると仕上げ面粗さが大きくなるとしているが、ノーズ半径が大きな工具での微小切り込みではノーズ部のみで切削し、前切れ刃角と横切れ刃角は同じ値となり共に大きくなることを考えると同様の結果を示していると言える。

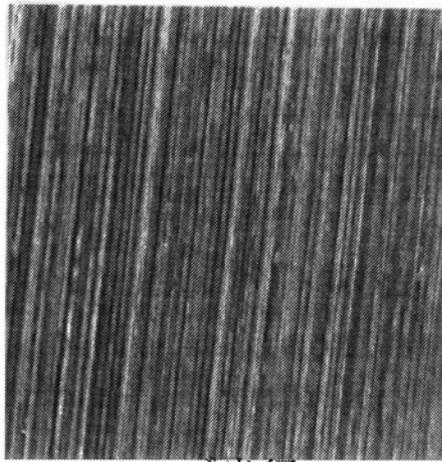
このように微小切削の場合の仕上げ面は、ノーズ半径を小さくすることや切削油剤を使用することによって改善が可能であることが確認された。



0.2mm
↔

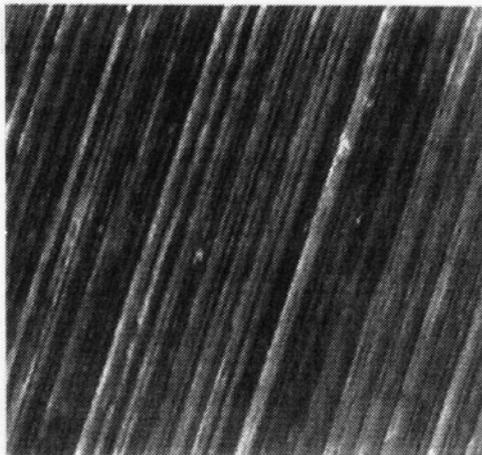
Workpiece:S35C
Tool:Cermet
Cutting speed:200m/min
Depth of cut:0.5mm
Feed rate:0.01mm/rev
Wet

(a)ノーズ半径0.2mm



0.2mm
↔

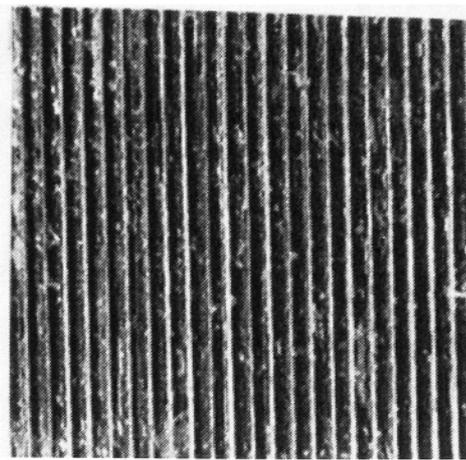
(b)ノーズ半径0.4mm



0.2mm
↔

(c)ノーズ半径0.8mm

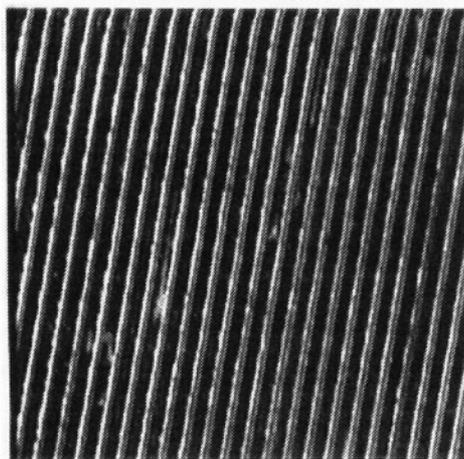
図4.19 湿式切削での表面写真



0.2mm
↔

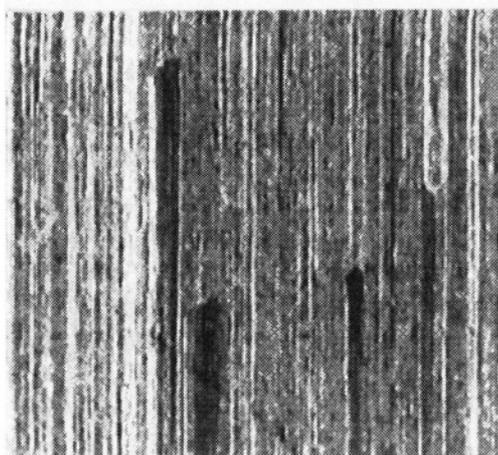
Workpiece:S35C
Tool:Cermet
Cutting speed:200m/min
Depth of cut:0.03mm
Feed rate:0.05mm/rev
Wet

(a)ノーズ半径0.2mm



0.2mm
↔

(b)ノーズ半径0.4mm



0.2mm
↔

(c)ノーズ半径0.8mm

図4.20 湿式切削での表面写真

4.4.2 フラットノーズ工具の利用

表面粗さを改善するためのもう一つの手法として、工具形状の改良を行う。表面粗さの理論式は式(4.1)で表されるように、仕上げ面が生成される部分であるノーズ半径(R)に反比例し、送り(f)の2乗に比例する。つまり、ノーズ半径を無限に大きくすると表面粗さは限りなく0に近づいてゆく。工具先端部をフラット(フラット幅は送り以上)にすれば、理論的には表面粗さを0にする事が出来る。

ノーズ部をフラットにした工具はソ連のKolesov²³⁾によって考案された。この工具の開発目的は重切削を行うためのものであり、荒削りと仕上げ削りの二段の刃を持った構造になっている²⁴⁾。また、主に送りを大きく(0.4mm/rev ~ 1.1mm/rev)するための工具であったため表面粗さについては考慮していない。

本研究では、図4.21に示すように、市販のスローアウェイチップの先端部を工具進行方向に対して平行に修正したフラット工具を作製した。工具先端をフラットにするのに万能工具研削盤を用い、フラット部の幅寸法は微小送り、ここでは(0.15mm/revでの実験を考慮して)0.15mmとした。フラット部分のすくい角や逃げ角等の寸法は、オリジナルのスローアウェイチップの値と同一になるように作製した。

図4.22にフラットノーズ工具で微小切削した時の表面粗さを示す。加工条件は図中に示す通りで、修正を施す前の通常のノーズ半径0.2mmのスローアウェイチップでの切削実験データも同時に示している。ここで、フラットノーズ工具での実験結果は送りで0.05~0.10mm/revまでしかないが、これは送り0.05mm/rev以下では工具摩耗が異常に進行しさらにひどいびびり音が発生し切削不能となったためである。実験結果より、今回の実験範囲では、ノーマルの工具の理論粗さよりは改善された。しかし、フラットノーズ工具での理論的な仕上げ面粗さは、今回の実験範囲では0になるはずであるが、実験では2 μ mが最も良い値であった。

図4.23(a), (b), (c)に図4.22での加工条件である送り0.05, 0.08, 0.1mm/revの時の表面粗さ形状を示す。比較のために図4.24に通常形状(送り0.05mm/rev)の工具による切削時の表面粗さ形状も示す。加工後の工作物の表面を観察した結果、構成刃先の発生は認められなかったが、各グラフとも送りマークがはっきりと確認できるほど粗さが

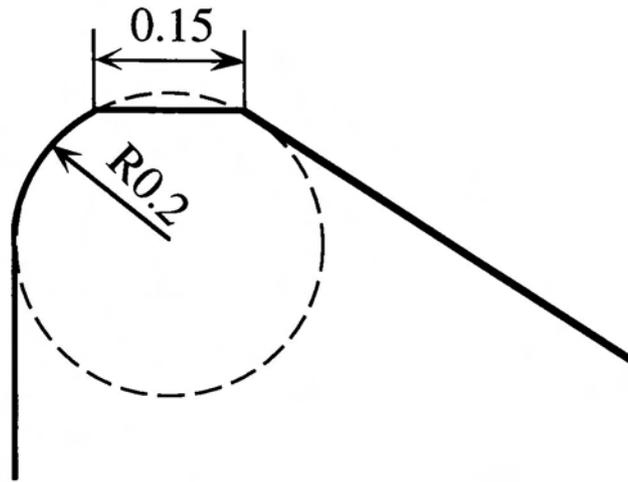


図4.21 フラットノーズ工具

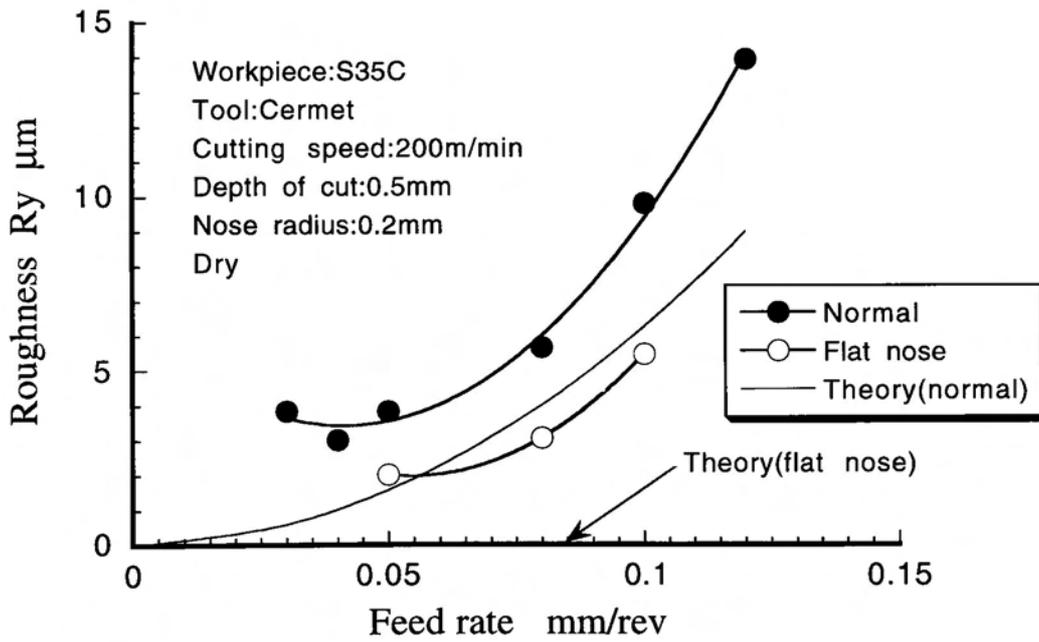
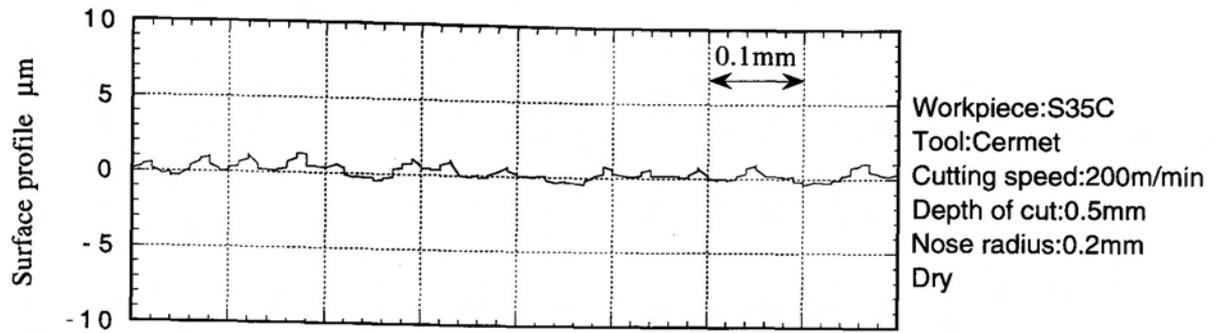
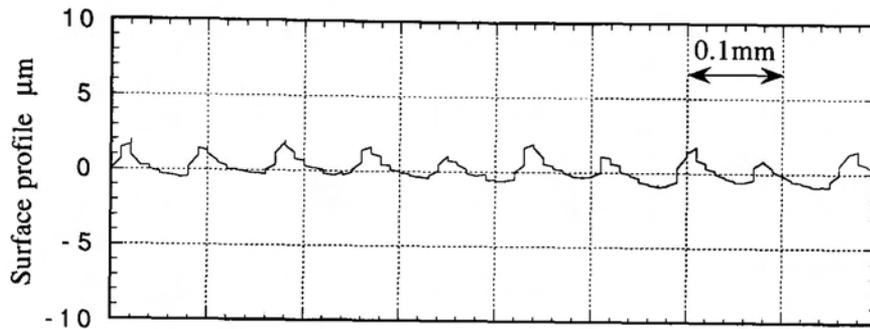


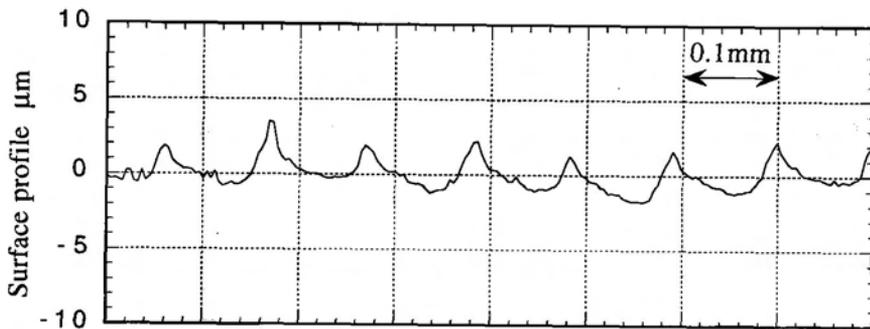
図4.22 フラットノーズ工具での切削



(a)送り0.05mm/revの場合



(b)送り0.08mm/revの場合



(c)送り0.1mm/revの場合

図4.23 フラットノーズ工具での表面粗さ形状

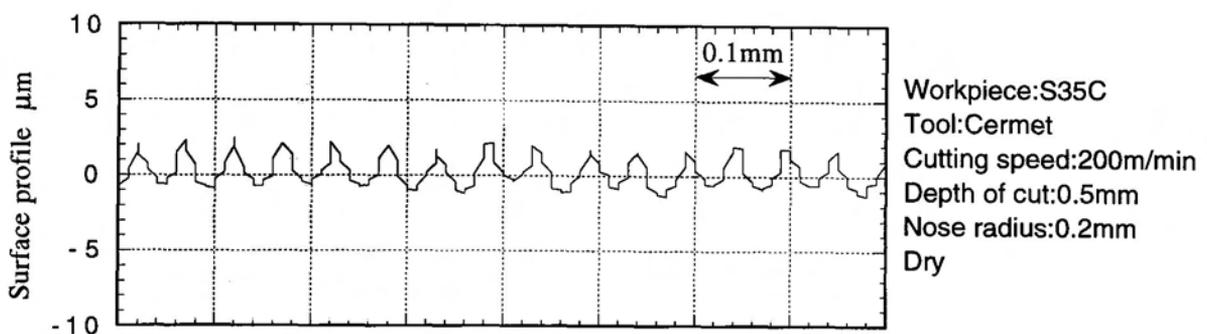


図4.24 通常工具での表面粗さ形状
(送り0.05mm/rev)

残っている。この原因としては、刃先をフラットに研削するため、旋盤の刃物台から工具を外し万能工具研削盤を用いて成形したため、フラット部が送り方向に対して、若干傾いていたことが考えられる。図4.23(a)よりその傾きを計算すると約0.5度である。図4.23(c)では、図4.23(a), (b)の場合よりも送りが大きく切削抵抗の送り分力も大きくなることから工具のたわみなどが考えられる。

今回のフラットノーズ工具では、フラット部を送りよりも大きくして実験を行ったが、実験結果よりフラット部は送りの3倍程度でないとその効果は十分に発揮出来ないことがわかった。つまり、送りがフラット部の幅の8割程度では、フラット部の効果よりも摩擦や接触部が長いことによる振動(びびり)などの逆効果の方が大きい。しかし、工具のフラット部を切削方向に対して傾けたり、フラット幅を送りによって変更する、非常に大きな円弧をつけるなど検討すれば、その効果は十分に発揮できる。

4.5 第4章のまとめ

本章では、最小設定単位が $1\mu\text{m}$ のCNC旋盤において最終的に到達出来る表面粗さについての検討を行った。「第3章」では、このCNC旋盤を用いて最小設定単位近傍まで、加工精度を制御することが可能となった。しかし、これは既に表面粗さのオーダーに達しており、さらに加工精度を向上させるためにはこの表面粗さを制御しなければならない。精度制御のための補正加工では、微小切り込み、微小送りでの切削が必要になるが、これに関する研究報告は殆ど見当たらず、未解決な問題である。

今回の研究では、送りが 0.05mm/rev 以下、切り込み 0.1mm 以下を微小切削として取り扱い、さらに高能率加工の観点から切削速度を 200m/min から落とさずに加工条件を設定した上で表面粗さに関する実験を行い検討した。また、工具・工作物は超硬工具、コーティッド工具、サーメットと市販のスローアウェイチップを用い軟鋼(S35C)を切削した。

微小切削範囲での切削実験を行い、以下の成果を得た。

(1) 長手方向切削で送りが 0.05mm/rev 以上の範囲では、送りを下げると表面粗さの

値は理論値と差はあるが、傾向はほぼ一致する。しかし、これ以下の送りでは逆に大きくなりその値もばらつきも大きくなる。また、非定常要素として工作機械の誤差や、切削機構による影響を防ぐための正面切削では、送りが0.05mm/rev以上の範囲で理論値とかなり良い一致をみたが、それ以下ではやはり、長手切削と同様の傾向を示した。

(2) 通常範囲の切削条件では、ノーズ半径が大きいほど理論式の傾向に従い表面粗さは小さくなるが、微小切削範囲では逆の傾向を示す。これは、切り込みが同じ場合にはノーズ半径が大きいほど実効切削厚さが薄くなり、ノーズ部の接触長さが増しそれに伴い切削温度が下がり構成刃先が発生するためである。

(3) 工具材種による表面粗さの影響については、サーメット工具が他の超硬工具、コーティッド工具に比べ良好な結果を示した。これは、サーメット工具が耐摩耗性に優れ、鋼との反応も少ないという特徴があり、表面粗さ悪化の主要因である構成刃先の発生のキーポイントとなる親和性が低いためである。

(4) 切り込みは、理論的な表面粗さを決定するファクターではなく、事実通常範囲では全く影響がない。しかし、微小切り込みの場合には送りが小さくなるのと同じ効果があり、微小送りの場合と同様の傾向を示し、構成刃先の発生により表面の品位は下がってしまう。

以上のことより、次の2項目に着目して表面粗さを改善するための対策を施した。

(1) 構成刃先の発生しない環境を創るために、切削油剤を用いて微小切削加工を行った。その結果、ノーズ半径が大きな場合を除いて効果が発揮できた。微小切削以上の加工条件では、切削油剤の効果は全く現れないかむしろマイナスの効果がある切削油剤は微小切削範囲では非常に有効であることが確認された。

(2) 表面粗さの理論式より、ノーズ半径を無限大にすることを考え工具先端のノーズ部をフラットにした工具を作製した。この工具を使った切削実験では表面粗さを0にすることは出来ないが、フラット幅の寸法や送りの設定、さらにはオンマシンで送り方向に平行にフラット形状を成形することによってその効果が期待できる。

本章では、微小範囲（切り込み、送り）での切削を行ったが、加工条件の組み合わせ

せは無限大であり,その中で微小切削の範囲といってもその組み合わせは少なくない. 工具材種も日々進歩し新しいものが開発されている. 仕上げ面改善のために用いた切削油剤についても同様に,近年金型加工で効果を上げている, 高圧クーラント²⁵⁾ に代表されるようにそのかけ方等も改良されている. 今後, 以上の項目に関する更なる研究が必要と考えられる.

第4章の参考文献

- 1) JIS B 0621：形状精度の定義と説明
- 2) 例えば井川直哉, 島田尚一：超精密切削加高の精度限界, 精密工学会誌52, 12 (1986) 2000.
- 3) 井川直哉, 島田尚一, R.R.Donaldson, C.K.Syn, J.S.Taylor, 大森義市, 田中宏明, 吉永博俊：極微小切削における切りくず形態と最小切取り厚さ, 精密工学会誌59, 4 (1993) 673.
- 4) 柴田隆行, 栗原賢二, 海野和也, 牧野英司, 池田正幸：銅単結晶の超精密切削における微小変形挙動の原子論的解析, 精密工学会誌, 623, 12 (1996) 1767.
- 5) 超精密加工マニュアル：応用機械工学編集部編著, 大河出版 (1989) 38.
- 6) 山本明, 中村示：微小切削による切削開始の条件について-切れ刃丸みを変化した2次元バイトによる実験的研究-, 精密機械, 34, 5 (1968) 18.
- 7) 大野幸彦：旋削仕上げ面あらさに関する研究, 機械技術研究所報告第91号 (1977) 30.
- 8) 高橋：微小切り込み用FP型ブレーカチップの効果と使い方, ツールエンジニア (1987.12)
- 9) 新版精密工作便覧, 精密工学会編, コロナ社 (1992) 111.
- 10) JIS B 0601：表面粗さ 定義及び表示 (1994)
- 11) 佐田登志夫：工作機械の精度と切削加工面粗さ, マシナビリテイ, 4, 3 (1966) 54.
- 12) 隈部淳一郎, 福田俊穂：旋削仕上げ面あらさ向上に関する研究, 精密機械, 36, 6 (1970) 409.
- 13) 臼井英治：切削・研削加工学 上, 共立出版 (1971) 202.
- 14) 7) に同じ
- 15) 奥島啓式, 垣野義昭, 藤田成良：S45C鋼の仕上切削時に生じる表面粗さの原因について, 精密機械, 38, 2 (1972) 61.
- 16) 6) に同じ

- 17) 機械工学便覧, 日本機械学会編 (1980) 127.
- 18) B.C.Tilghman:US-Patent No.416873.v.10.12(1889)
- 19) 竹山秀彦:切削加工 (大学講義), 丸善株式会社 (1980) 127.
- 20) 中山一雄:切削加工論 (機械工学大系), コロナ社 (1978) 58.
- 21) JIS K 2241:切削油剤 (1986) 2.
- 22) 6) に同じ
- 23) ソ連における高速重送り切削, 機械の研究, 9, 8 (1957) 643.
- 24) 機械用語図解辞典:工業教育研究会編, 日刊工業新聞社 (1977) 238.
- 25) 森本晃:高速・高品位の加工を可能にするクーラントシステム, ツールエンジニア, 大河出版 (1997) 54.

第5章 総合旋削システムの開発

5.1 緒言

NC工作機械による加工のメリットは、大量生産が可能な点にある。図5.1に加工の複雑度とロット数の関係を示す。ここでロット数1、つまり1回の段取りで1個の製品しか作らない場合でも、その形状が複雑で人手では全く加工出来ないものは、NC加工

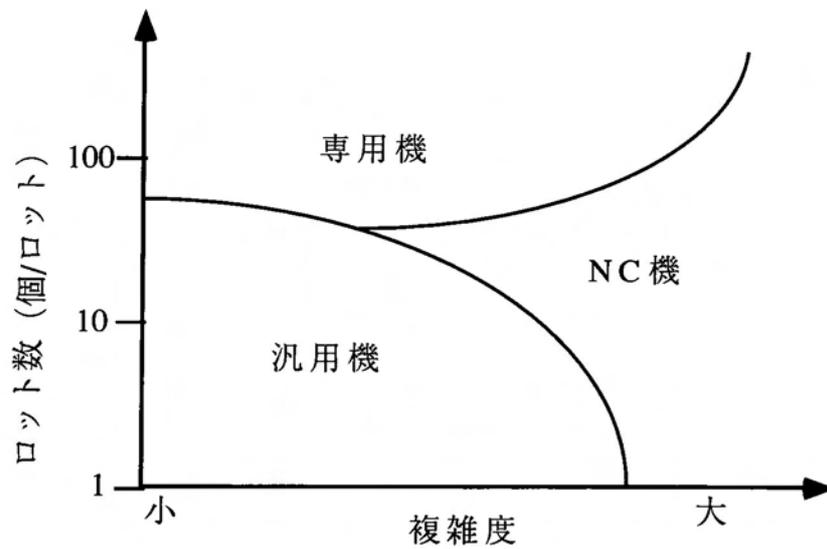


図5.1 加工の複雑度とロット数の関係

に適する。また、汎用の加工機では工程数が多く、1工程のうち正味切削時間に比べて非切削時間の割合の大きなものもNC加工に適している。近年、マイクロエレクトロニクス技術の急速な発展に伴い、市販されるNC装置もコンピュータ内蔵のCNC旋盤に変貌を遂げている。このようなCNC旋盤の変貌と共に、入力媒体を穿孔型テープのみとしたものから計算機を直接接続してNC命令^りの通信が可能なRS-232Cシリアル通信ポートを備えたものが一般に使用されている。また、MDI方式でキーボードからNC命令を入力したり、編集機能を利用してNC命令の修正・変更を容易にしている。さらには高分解能カラーCRTディスプレイを装備し工具経路を描画させ工具が予定の動きを示すかを予め確認する機能も備えている。

このようなCNC旋盤は、手動（アナログ）で汎用旋盤の刃物台を操作するのと違い、工具経路（形状の輪郭）を全て座標（デジタル）で指定するNC命令が必要になる。ところが、設計図面からNC命令を作るまでの手順を正確に短時間でかつ安価に行うことが出来なければ、NC化の効果も上がらず生産性の向上も望めない。NC命令の作成時間を左右する要因として、オペレータの経験や能力にもよるが、実際の現場では形状の複雑さと冗長度があげられる。図5.2に示すように、マニュアルプログラミングは、形状が複雑になればなるほど、また、加工工程が長くなればなるほど、NC命令作成時

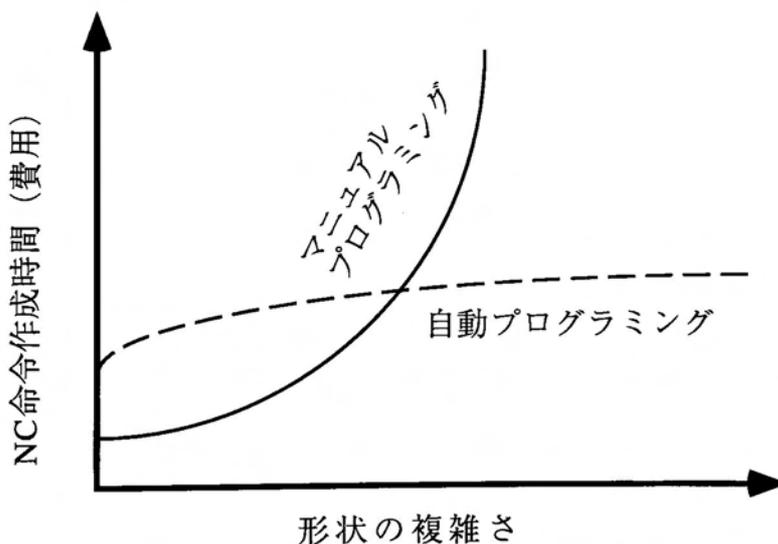


図5.2 形状の複雑さに対するNC命令生成時間

間は長くなり費用もかかる。自動プログラミングは、形状が簡単でも複雑でも、NC命令作成に要する時間や費用はあまり変わらない。

NC工作機械を利用する事の最大の利点は、段取り（加工のための準備）を簡便に短時間で行うことにある。そのため、高精度な加工が再現性良く行えるこのような機械を十分に使いこなし、効率の良いNC命令を生成することは不可欠である。こういった要求に応えるため、コンピュータを利用してプログラミングを行う手法がAPT²⁾ (Automatically Programmed Tools = 自動プログラミング) という形で開発されている。このようなプログラムの必要性は、既にアメリカのM.I.T.によってNCフライス盤が完成された1952年の時点から指摘されていた。表5.1に、それらの代表的なものを示す。さらにAPT系とは違った自動プログラミングシステムとして、国内においても井上らのシステム⁴⁾ やSTORK2⁵⁾、MELTS⁶⁾、KKTS⁷⁾ 等が開発されている。

図5.3に鍵穴形状の加工を例にとり、APTのパートプログラムと手計算によるNC命令の例を図5.4、図5.5に示す。先に述べたように、加工形状が単純な場合にはマニユ

表5.1 代表的な自動プログラミングシステム³⁾

プログラムの種類	開発 (所有)	加工対象軸数	加工対象	使用コンピュータ (年代)
ADAPT(APT II)	アメリカ	2	汎用	各種 (1952)
APT II	アメリカ (IITRY)	3~5	〃	IBM 7090
APT IV				
EXAPT I	ドイツ (EXAPT Verien)	3	穴あけ	FACOM 230-50 (1965)
〃 II		2	切削	
FAPT II	日本 (富士通)	3	汎用	FACOM 270-10 (1970)
HAPT	〃 (日立)	2	〃	(1973)
TAPT	〃 (東芝)	2	〃	
FMASH	〃 (富士通)		曲面切削	
AUTOSPOT	アメリカ (IBM)	1	穴あけ	IBM 1620
PRONTO	〃 (GE)	3	汎用	GE 225

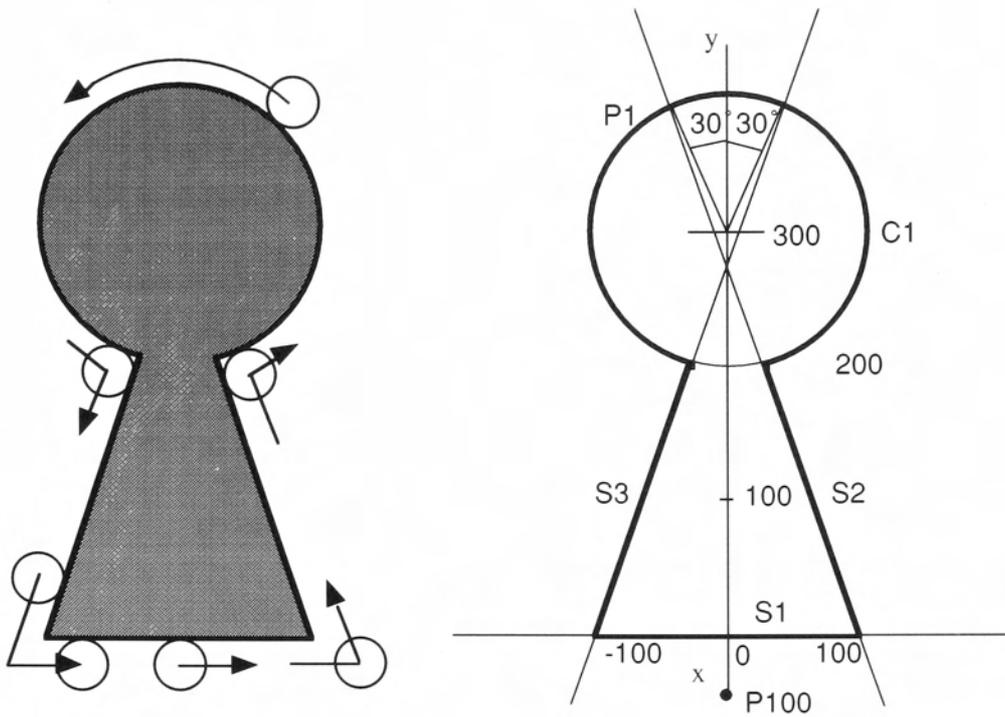


図5.3 鍵穴形状の加工例

```

PART,@KEY          ..... @の後には部品名などを入れる
MCHN,MILL,ABS      ..... フライス加工の場合はMILLを入れる
CUTTER,20          ..... カッター直径の指定
FROM,P100(0,-50)   ..... 加工開始点
C1=0,300,100       ..... 円C1の定義
P1=P(C1),100,120A  ..... 円周上の点P1の定義
S2=P(100,0),P1     ..... 直線S2の定義
TLRGT              ..... 工具を形状の右側に沿わせるための指定
FCOD,100           ..... 送り速度の指定
TO,S1(0Y)          ..... 点P100から直線S1に接する用に移動
S1                 ..... 直線S1に沿って右折
S2,L               ..... 直線S2に沿って左折
C1,CCW,B           ..... 円C1に沿って反時計回りに移動
S(S2,Y)            ..... y軸に対してS2と対称な穿に沿って移動
S1,ON,S(OX)        ..... S1に沿って刃物中心がy軸上になるまで移動
P100                ..... 点P100にもどる
FINI                ..... プログラムの終了
PEND
  
```

図5.4 APTによるパートプログラム

```

G92X0Y-50000Z0
G90G01Y-10000F1000
X11460
X34813Y195654
G17G03X-34813I1-34813J104346
G01X-11460Y-10000
X0
Y-50000
  
```

図5.5 手計算によるNCテープ情報

アルプログラムの方がNC命令作成の時間は短いことが分かる。しかし、三次元形状のように加工形状が複雑になると、直線同士の交点の座標計算や円弧の中心座標の算出が困難になり、マニュアルプログラムでは対応出来なくなる場合が多い。APTは世界

表5.2 APTにおけるパートプログラム用語

形状定義用の単語

NC言語	英語	日本語
BCi	basic curve	基準曲線
Ci	circle	円
COi	cone	円錐
CVi	curve	曲線
CYi	cylinder	円筒
DCi	drive curve	動作曲線
Gi	grid	点群
Pi	point	点
PLi	plane	平面
Si	straight line	直線
SPi	sphere	球
SSi	sculpture surface	自由曲線
Ti	tabulated cylinder	点列接続曲線

※iは任意の整数値

関数表現用の単語

NC言語	英語	日本語
ATAN	arc tangent	逆正接関数
COS	cosine	余弦関数
RND	round off	四捨五入
SIN	sine	正接関数
SQRT	square root	平方根
TAN	tangent	正接関数

処理の流れに関する単語

NC言語	英語	日本語
CALL	call	マクロ呼出し
COPY	copy	繰返し
CYCL	cycle	サイクル
FINI	finish	終了
IF	if	もし…ならば
JUMP	jump	分岐
MAC	macro	マクロ
PART	part program	パートプログラム開始
PEND	part program end	パートプログラム終了

工具状態や運動指令に関する単語

NC言語	英語	日本語
CCW	counter clockwise	反時計回り方向
COM	cutter compensation	工具径補正
CUTTER	cutter	工具径
CW	clockwise	時計回り方向
DLT	delta	増分位置決め
FACE	face	端面加工
FCOD	feedrate code	送り速度コード
FINE	fine	仕上げ
FROM	from	…から(加工開始)
GROV	groove	溝切り加工
MFIN	medium fine	中仕上げ
ON	on	…の上に
PAST	past	…を過ぎて
ROUG	rough cutting	荒加工
RPD	rapid	早送り
TANTO	tangent to	…に接して
THICK	thickness	仕上げしろ
THRD	thread	ねじ切り
TLLFT	tool left	工具左
TLON	tool on	工具真上
TLRGT	tool right	工具右
TO	to	…まで
TOOL	tool	工具

的な基準に準じたものが各社から市販されているが、最大五次元形状加工までを前提としているため表5.2に示すようにパートプログラムについても多くの図形定義や運動定義が必要になる。現在多くの生産現場では、NC加工を行う際にコンピュータの自動プログラミングシステムを用いNC命令を生成する作業者と、実際に工作機械を操作する作業者は別々である。そのため、工作機械を操作する作業者が英語の略語を多用したAPTを十分に使いこなさず、経験やノウハウを十分に活かしたNC命令生成を行うのは困難である。また、旋削加工は立体形状（回転体）を加工するのに、工具は二次元平面の動きで済むことや、X軸（直径）の指令が半径方向の移動の2倍になるなど本来のAPTが開発されたフライス盤の指定とは異なる部分が多い。

本章では、NC工作機械を最小設定単位 $1\mu\text{m}$ のCNC旋盤に限定し、現場の熟練作業者の経験やノウハウが十分に活かせるNC命令を作成するための、総合旋削加工用自動プログラミングシステムITSYS（Integrated Turning System）について述べる。このシステムは、本章で述べる旋削加工用自動プログラミングシステムを基本構成とし、第2章「オンマシンによる旋削加工誤差測定」で示した旋盤の幾何誤差測定とは違った加工誤差測定法と測定用NC命令作成やデータ管理、さらには第3章「オンマシンによる旋削加工誤差補正システムの開発」の誤差補正用NC命令生成や誤差のデータベース化より構成される。誤差補正用NC命令生成においては、第4章「微小切削での表面粗さ」での成果を踏まえ、必要に応じて切削油剤の供給やフラットノーズ工具の選択を行う。

5.2 自動プログラミングシステム

5.2.1 ハードウェア構成

CNC旋盤の位置決め制御指令には、絶対値（アブソリュート）方式と相対値（インクリメンタル）方式およびそれらを組み合わせた方式がある。各点の座標は、PTP（Point to Point）方式で指定するが、絶対値方式の場合、予め定義されたワーク座標系を基準とした絶対座標で与えられる。相対値方式では現在工具のある位置からの増分で与えられる。組合せ方式の場合は、これらが併用される。現在市販されているCNC

旋盤は、殆どが上記の3つの機能を備えている。それぞれの特徴は以下の通りである。

(1) 絶対値方式

- ・長所：座標の計算ミスは、その座標のみで他の座標に影響しない。
：連立方程式で座標の計算が容易。
- ・短所：NC命令の1ワードが長くなる。

(2) 相対値方式

- ・長所：NC命令の1ワードが短く、メモリの節約になる。
- ・短所：1ヶ所の座標計算ミスが、以降の座標全てに影響する。

このように、両者一長一短あるが、今回開発したITSYSではこれら両方の長所を活かして効率の良いNC命令を生成する。

本研究に使用するハードウェア構成を図5.6に示す。また、表5.3、表5.4にはそれぞれの仕様を示す。

ITSYSのソフトウェアのベースとなる、コンピュータは16ビットのパーソナルコンピュータである。本システムの開発に当たっては、以下のことを考慮して開発言語は安価なパーソナルコンピュータ上で動作可能なBASIC言語を使用した。

- (1)三次元CAD/CAMシステムのような複雑な計算は必要ない。
- (2)旋盤の動作は二次元であり、メモリを大量に必要としない。
- (3)加工誤差自動測定システムにおいて、A/D変換器やDIOが制御し易い。

工作機械として、瀧澤鐵工所製CNC旋盤TC-2、FANUC社製CNCコントローラTC-Fを使用する。CNC旋盤とパーソナルコンピュータのNC命令はRS-232C通信回線を、加工誤差データ収集やその際の同期はCNC旋盤に最小限の改造を施しDIO(Digital I/O)を介して接続される。

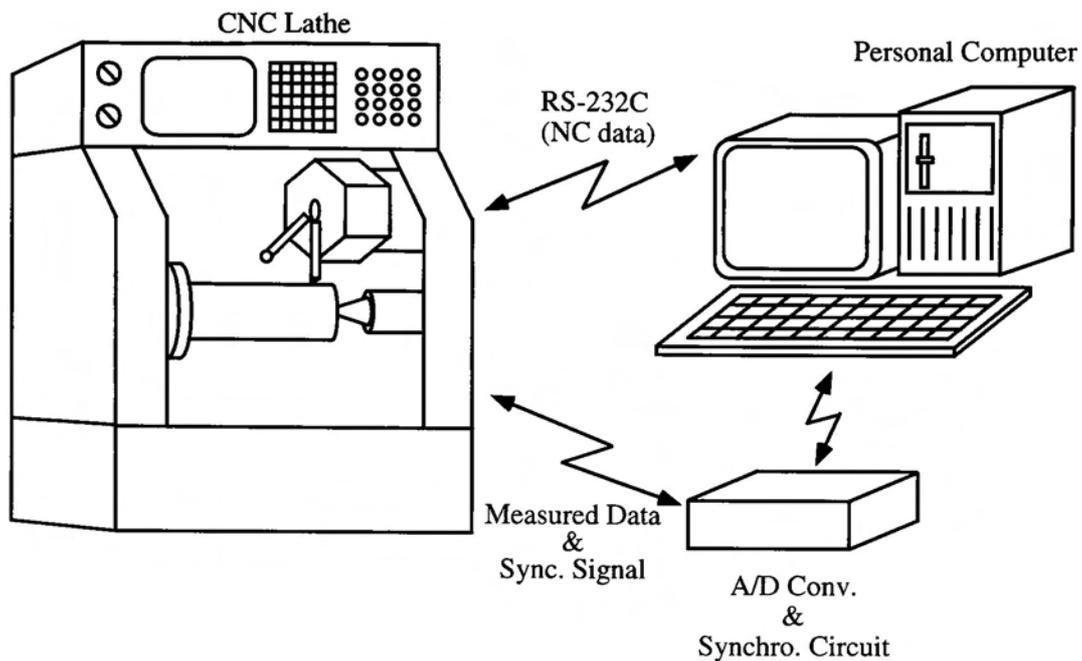


図5.6 ITSYSのハードウェア構成

表5.3 パーソナルコンピュータの仕様

デバイス名	仕様
CPU	Intel 8086(8MHz)
メモリ(RAM)	512kB
ディスクドライブ	640kB (1台)
ハードディスク	8.1MB
I/Oバス	ASYNC通信カード(RS-232C) DIO(4ポート)
CRT	15"単色 (1024×768ドット)

表5.4 CNC旋盤の仕様⁸⁾

加工能力	ベッド上の振り	φ 350	
	往復台上の振り	φ 320	
	最大加工径	φ 260	
	標準加工径	φ 210	
	両センター間距離	370mm	
	チャックサイズ	8"	
主軸	主軸端形式	JIS-A2-6	
	主軸径 (前ベアリング)	φ 100	
	主軸貫通穴径	φ 58	
	回転数 (無段)	160~3200rpm	
	主軸電動機 (連続定格)	可変速AC5.5kW	
刃物台	刃物台形式	6角ドラム (対辺260mm)	
	外削刃具サイズ	25×25	
	内削バー径	φ 40	
送り	最小設定単位	0.001mm	
	最大指令値	±999.999	
	X軸移動量	140mm	
	Z軸移動量	370mm	
	切削送り		0.001~40.000mm/rev
			1~5000mm/min
	早送り (X軸)	8000mm/min	
	早送り (Z軸)	12000mm/min	
送りサーボモータ X/Z	0.8/0.8kW		
心押台	心押軸径	φ 75	
	心押軸移動量	100mm	
	心押軸テーパ	MT No.4	
補機類	油圧ユニット電動機	0.75kW	
	油圧ユニットタンク量	40L	
	切削油ポンプ	0.25kW	
	振動面潤滑ポンプ	0.01kW	
寸法	機械幅(X)×(Z)	1250×1600mm	
	高さ	2000mm	
	概重量	2300kg	

5.2.2 形状データ入力

旋削加工は、工作物のZ軸を回転軸とした回転体として定義され、その断面はZX座標系の2次元図形として表現できる。ここでは、データの入力のし易さを考慮して形状定義を行う。図5.7で示される工作物について、設計形状を全て直線で表現された図5.8のようなデータ入力用の形状を考える。この直線の交点を形状データ入力点として、入力点の座標値(Z,X)、形状パターンPT、その円弧半径Rを1組として、形状データ入力点毎に入力してゆく。ここで、Xの座標値は形状データの座標値そのまま、つまり、実際の仕上げ形状の半径を代入する。図5.9は各形状パターンとその入力値を示したもので、PT=0の場合には円弧半径にR=0を入力する。用意される形状パターンは、

- ・ PT=0：直線と直線の交わり
- ・ PT=1～4：2直線に接する円弧
- ・ PT=5, 6：1つの直線に接し、他方で交わる円弧
- ・ PT=7：PT=5, 6の組合せ
- ・ 溝切り

である。溝切りについては、PT=0から7までの形状とは違い、溝切り専用工具を使用するので追加処理されデータ入力形状からは省いておく。

入力されたデータは、入力点を P_i ($i=0,1,\dots,N$) とする入力点番号 i に対応する配列変数にそれぞれ代入され、以降の処理に利用される。さらに、工具形状・切削条件として、工具ノーズ半径(R)、工具前切刃角(TH)、材料径(D)、削り代(T)、切込み量(T1)、切削速度(V)、送り(F)、表面粗さ(RM)を入力する。

入力された仕上げの加工条件(切込み、送り)が第4章で述べた微小切削の範囲にある場合には、切削油剤の供給を選択することが出来る。

本システムで使用するCNC旋盤には、刃物が6本取付可能なターレットが装備されている。各刃物台に装備する工具形状を、図5.10に示す。工具1と工具2は、切削方向のみが違う左右対称形状の右勝手・左勝手のバイトホルダー・スローアウェイチップを使用し、工具1～3は工具位置をノーズ半径の中心に設定している。また、工具経路算出が容易なように同じノーズ半径のものを使用する。

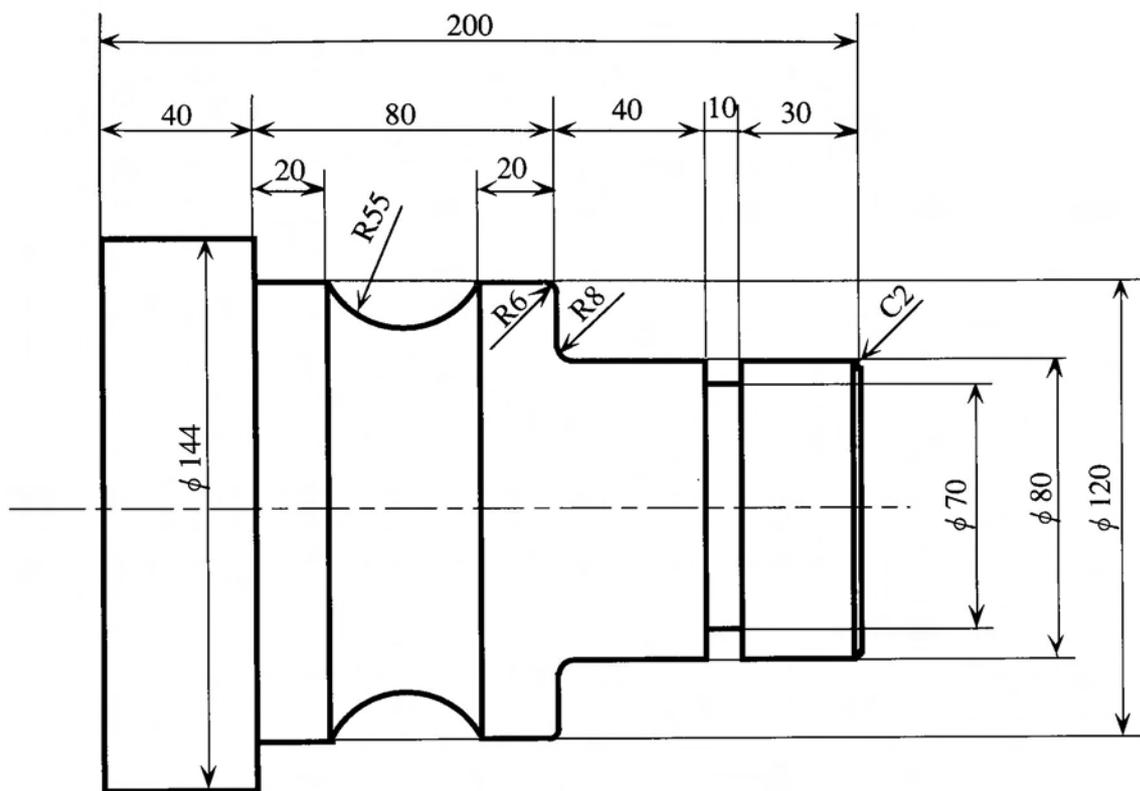


図5.7 工作物の仕上げ形状

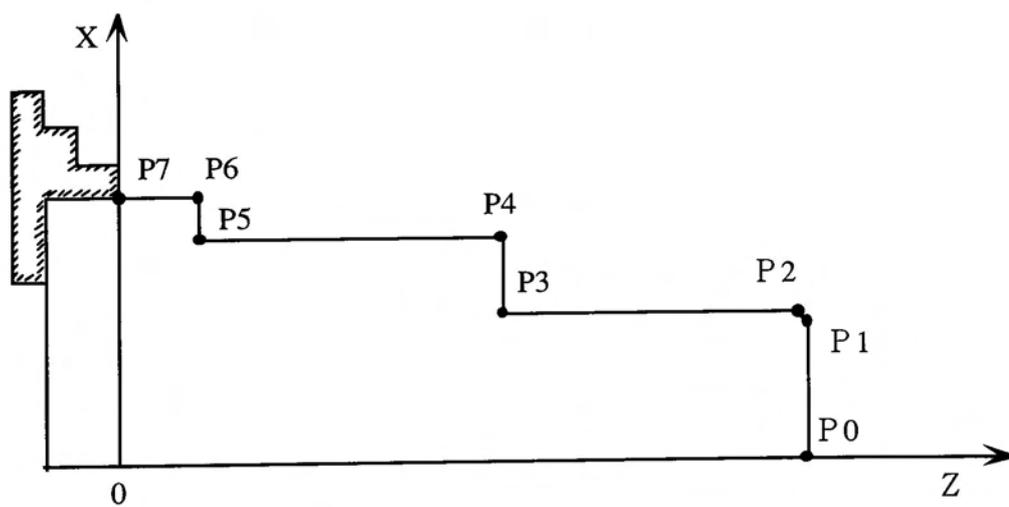


図5.8 データ入力形状

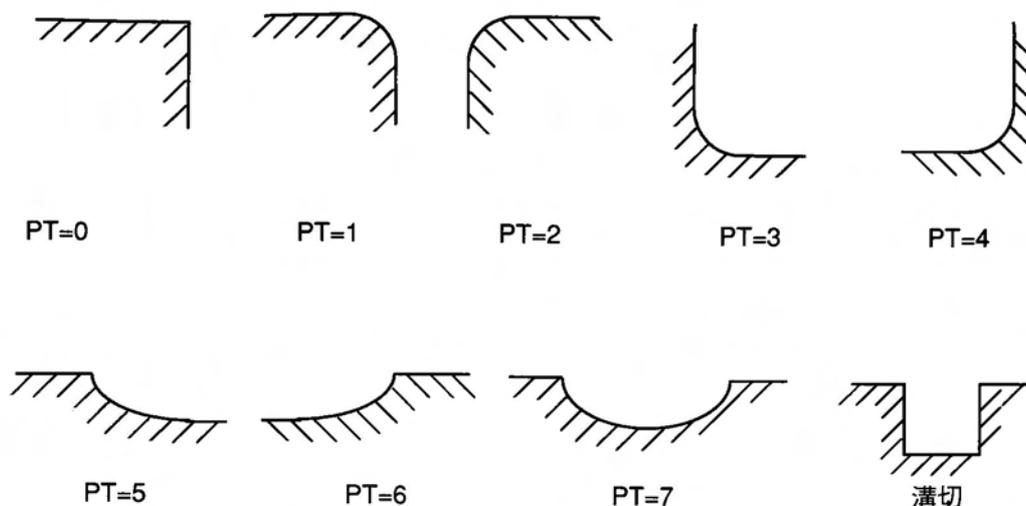


図5.9 形状パターン

5.2.3 工具の選択

旋削加工では、工作物の形状が、Z軸のマイナス方向に対して常に単調増加であれば、溝加工等の特殊加工を除いて1本の工具で加工が可能である。しかし、工作物直径がZ軸のマイナス方向に減少する場合、1本の工具では前切れ刃角の関係等から切削不可能な箇所が生じる。本システムでは、可能な限りの広範囲の加工が行えることを念頭におき、加工形状に合わせて工具の選択を行う。基本的には工具1で荒加工から仕上げ加工までを行うが、切削不可能な場合には工具2, 3を用いる。工具4は溝加工に使用する工具である。ねじ切りに関しての、G33⁹⁾ (一定リードのねじ切り)、G34 (漸増リードのねじ切り)、G35 (漸減リードのねじ切り) の作業は考慮していない。

また、仕上げの加工条件 (切込み, 送り) が第4章で述べた微小切削の範囲にある場合には、工具5の選択が可能になっている。工具5は工具1と同一形状の工具をフラットノーズにしたものである。

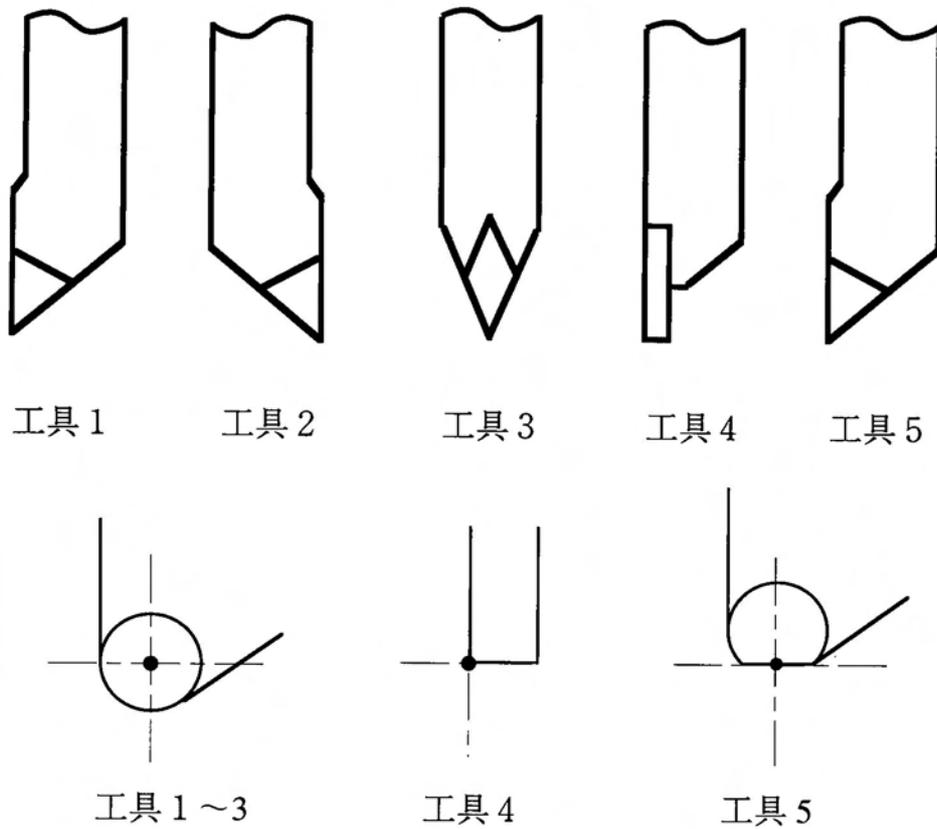


図5.10 工具形状

5.2.4 工具経路変更点の算出

本システムでは、1回のチャッキングで加工を終了するという前提に立ち、工具1を主に使い、長手方向に送り切削するという考え方で工具経路を決定する。工具位置は工具ノーズ半径の中心にとっているため、プログラムにより計算された工具経路は刃先ノーズ半径の中心が通る軌跡となる。

仕上工具経路では、刃先ノーズ半径について、また、荒仕上工具経路では、削り代と刃先ノーズ半径についてオフセットを行い経路を決定する。算出方法は、まず形状入力点 P_i と、その前後の点 P_{i-1} 、 P_{i+1} の3点から点 P_i の前後の直線 $\overline{P_{i-1}P_i}$ と $\overline{P_iP_{i+1}}$ を考え、それぞれを1次関数 $x = az + b$ で表し、係数 a 、 b を求める。刃先ノーズ半径を補正した工具経路の直線部は、 $x = az + b\sqrt{a^2 + 1}$ で表される。このとき、補正された工具経路が変化する点（変更点と呼ぶ）は、形状パターン $PT=0$ のような直線の交わりの場合、この2

直線の交点が変更点となる。また、PT=1~4のように直線に接する円弧の場合は、補正直線の交点から円弧中心の座標を求め、円弧開始点と終了点を直線と円弧の接点として算出する。以上のような処理を形状入力点 P_1 から P_{N-1} まで行い、仕上、荒仕上加工の工具経路変更点を決定する。ここで、 P_0 と P_{N-1} は計算上必要な点であり、切削は P_1 から P_{N-1} まで行われる。

続いて、荒仕上工具経路を基準にして荒加工工具経路を生成する。この際、仕上形状に図5.11(a)に示されるようなX軸方向に径の減少が起こるとき、工具1の取付角(TH1)以上の角度であると切削不能領域が生じる。このような場合、工具2,3で対処するが、工具1で可能な限り切削するため、プログラムは点Cを通り、傾きが $\tan(\text{TH1})$ のテーパ部を生成する。このテーパ部と工具の切込み位置から各切り込み時のテーパ終了点を算出し工具1の経路を決定し、さらにこの情報をZ(+)方向の切削が必要かどうかの判定に利用する。テーパ部の工具経路は、たとえば図5.11(a)の場合、同図(b)

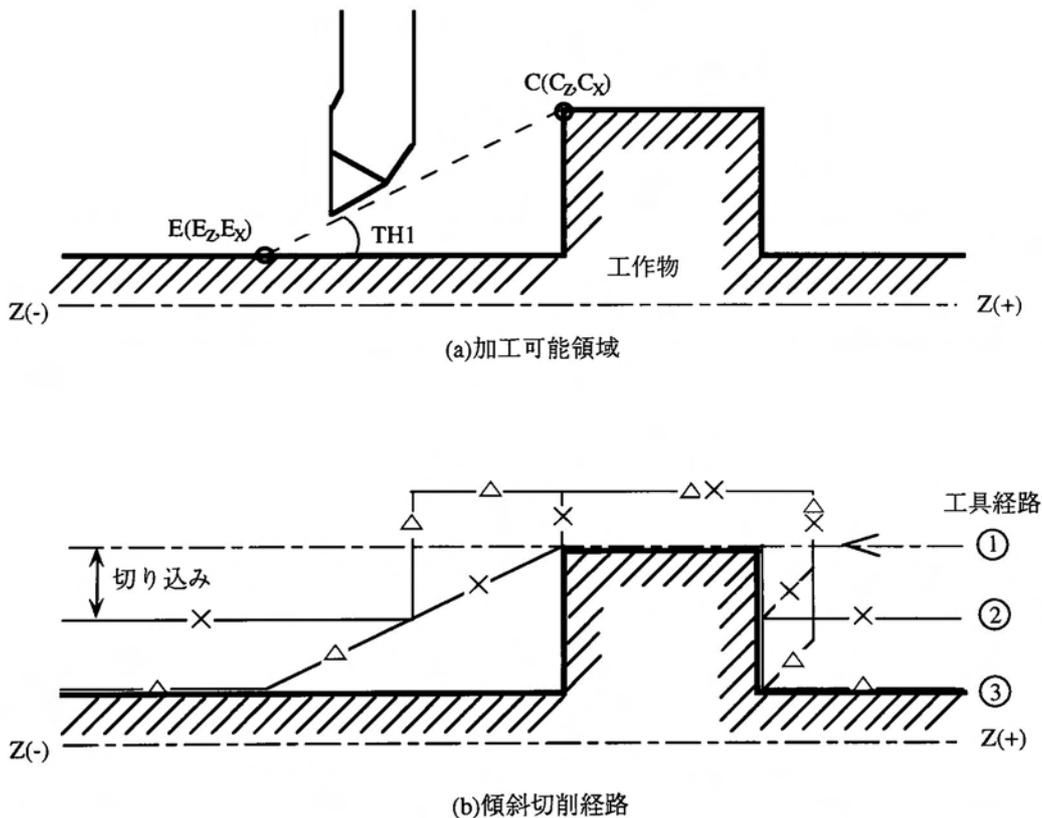


図5.11 工具1による切削不能領域の対処法

に示されるようになる。テーパ部は工具2でZ (+) 方向に切削するが、テーパ部終了
点に工具2の刃先が到達できない場合もある。このときには、工具2の取付角 (TH2)
でZ (+) 方向に減少するテーパ部を作り、工具1と同様な工具2の経路を生成した上
で、さらに残る2つのテーパ部の積である三角形状領域を工具3で削り取る。その様
子を図5.12に示す。

荒加工の工具経路は、基本的には工具の切込み位置Xと荒仕上工具経路の交点のZ
座標を直線と直線、または直線と円弧の連立方程式の解として求め、その点を変更点
とした切削指令を作成することで定められる。この操作を点 P_{N-1} まで行い、その後、工
具を工作物から離脱させ、定点復帰のあと新たに切込み位置を設定し、同様の処理を
繰り返す。工具が変わるときには工具交換指令を発生させる。このようにして全工程
の処理終了後、終了指令 (M02) を作成し、NC指令が完成する。NC指令はNC装置
にEIAコードで転送する必要があるので、EIAコードに対応した1バイトの2進数に変
換され、メモリーに直接保存することで、メモリー要領を節約している。

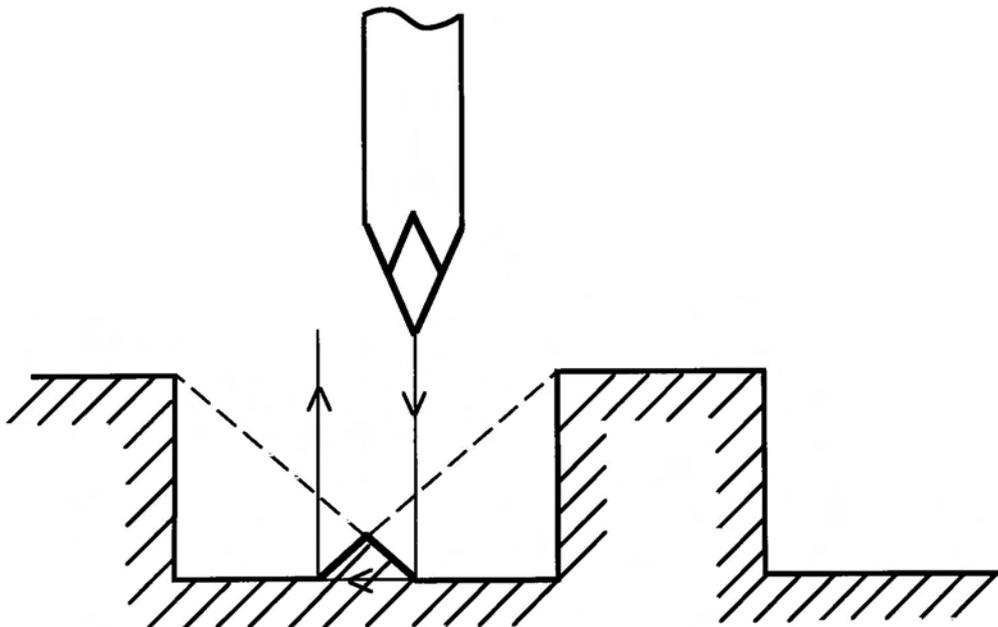


図5.12 工具3での切削

5.2.5 加工例

図5.13に示す形状を例に考えると、図5.14に示す19の入力点でデータ入力形状を表すことが出来る。図5.15は形状入力データである。

本システムでユーザが設定出来る加工条件は、荒・仕上げの切削速度、荒・仕上げの切り込み、表面粗さ (R_y)、荒・仕上げの送り (仕上げ送りについては表面粗さの入力値より式 (4.1) を用いて決定) である。今回の例では加工条件として、工作物:S35C、工具:サーメット ($R0.8\text{mm}$)、荒加工の切り込み:1.0mm、仕上げの切り込み:0.5mm、荒加工の送り 0.5mm/rev、仕上げ加工の送り:0.3mm/rev、荒加工切削速度:150m/min、仕上げ切削速度:180m/minを入力した。以上のデータを基にNC命令を生成した結果、NC命令の総ブロック数は318、メモリ容量は約4kbyte、NC命令を生成するのに要した時間は約2分であった。工具経路は工具1の荒加工、工具2の荒加工、工具1の中仕上げ加工、工具2の中仕上げ加工、工具1の仕上げ加工、工具2の仕上げ加工の順で生成される。

ITSYSには生成されたNC命令のシミュレーションを行う機能が組み込まれている。NC命令はそれをコマンドとして表示するだけでは工具経路の確認が十分に行えないため、高解像度CRT上にその工具経路を表示させることで経路チェックを行う。図5.16

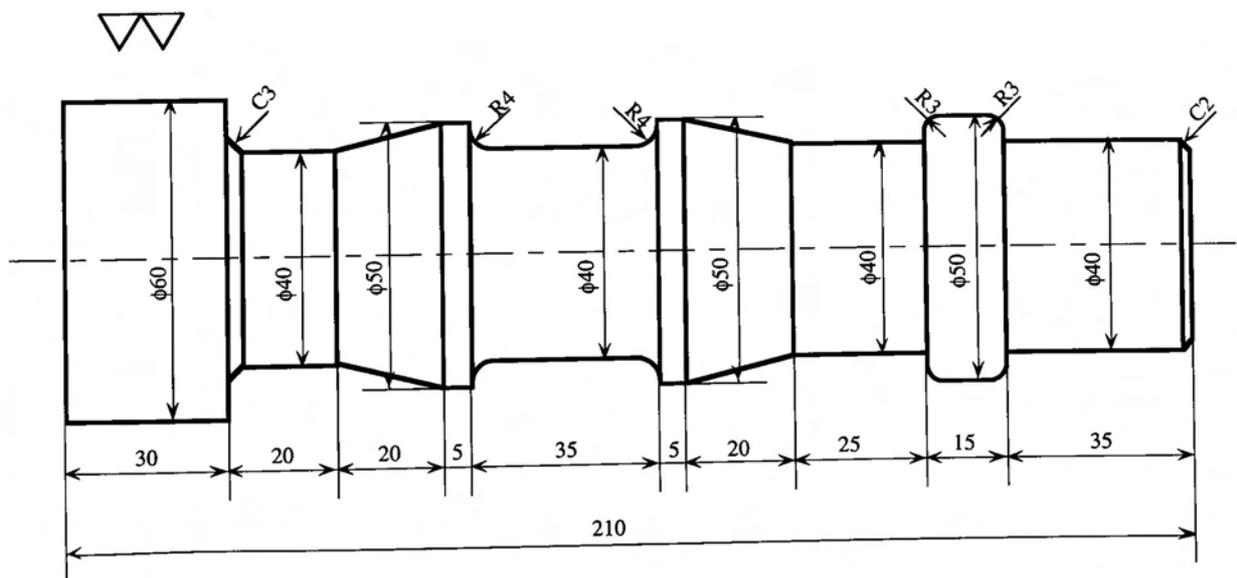


図5.13 最終仕上げ形状

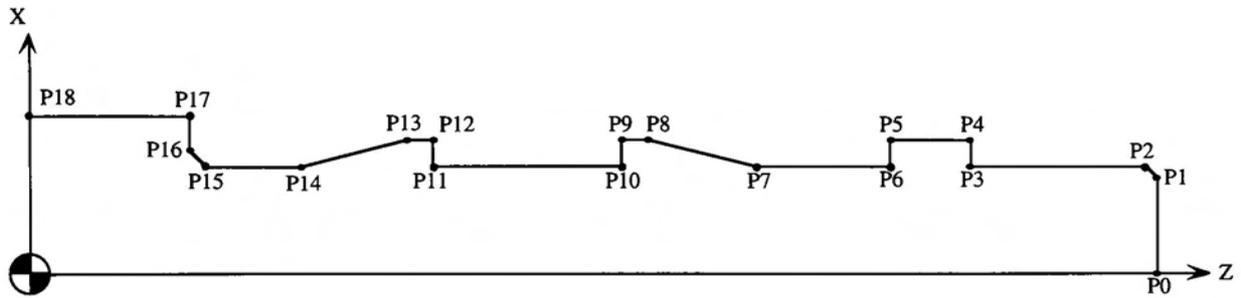


図5.14 データ入力形状

No.	Z	X	PT	R
0	210	0	0	0
1	210	18	0	0
2	208	20	0	0
3	175	20	0	0
4	175	25	1	3
5	160	25	2	3
6	160	20	0	0
7	135	20	0	0
8	115	25	0	0
9	110	25	0	0
10	110	20	4	4
11	75	20	3	4
12	75	25	0	0
13	70	25	0	0
14	50	20	0	0
15	33	20	0	0
16	30	23	0	0
17	30	30	0	0
18	0	30	0	0

図5.15 形状入力データ

に工具経路のシミュレーション結果を示すが、Z(-)方向に径が減少する箇所ではテーパ切削が行われ、工具2で切削されている様子が確認できる。図中の長い縦線は工具交換を表す。実際には、工具交換で刃物台が回転する場合には工作物との衝突を避けるためにx(+)方向に工具が遠ざかることが必要になる。この場所は工作物の原点(G50で工具位置を指定する場所)にとられる。図の上部には設計形状も描いている。これにより最終的な形状と合わせて、工具経路を確認することができる。

生成されたNC命令は、パーソナルコンピュータからRS232C通信回線を介してCNC旋盤に転送される。図5.17はCNC旋盤による加工結果である。

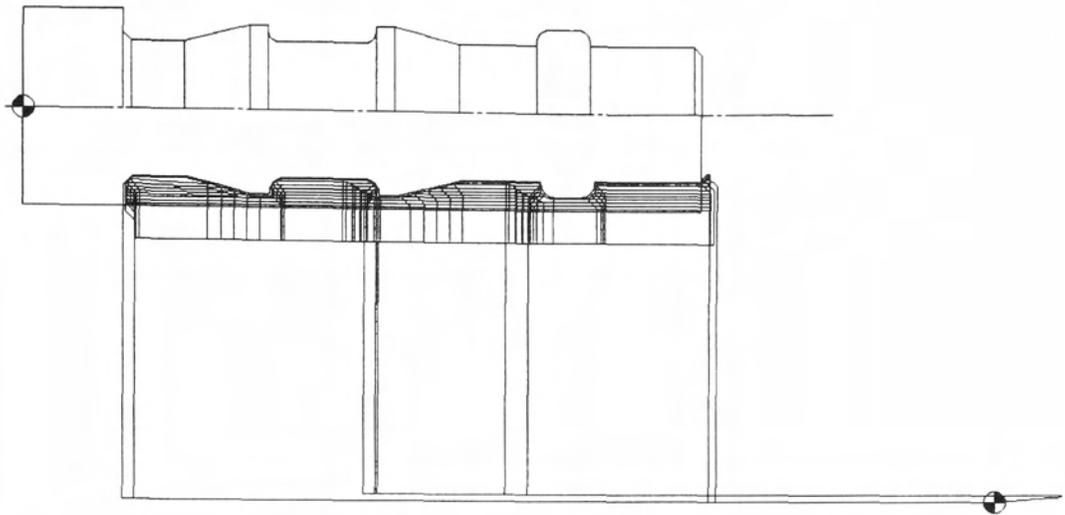


図5.16 工具経路シミュレーション

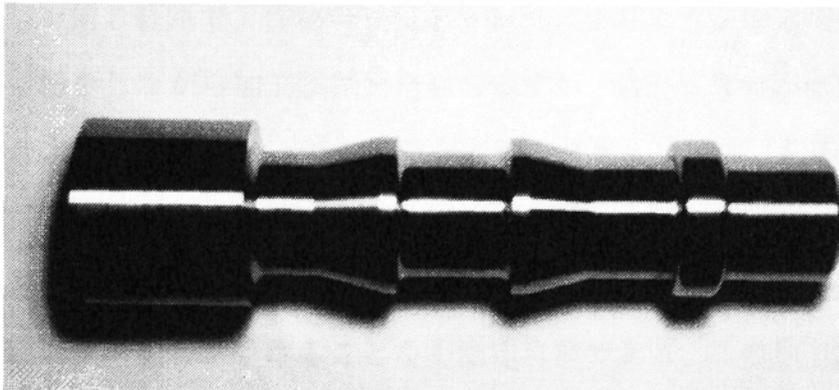


図5.17 加工例

5.3 オンマシンによる加工誤差自動測定システム

5.3.1 自動測定機能

加工精度は加工能率とともに機械加工の重要な要因であり、加工精度向上のための工作機械の構造の改善、運動精度・位置決め精度の改良など、様々な配慮がなされている。また、加工精度は加工に伴う誤差原因、すなわち、切削力による工作物や工具系の変形、発熱に伴う工具・工作物の熱変形などによって大きく低下する。このような加工誤差を定量的に評価することは加工精度を上げる重要な課題である。しかし、加工後工作物を外し他の測定器で測定した後再度工作物を取り付け、補正加工を行う

と取り付け・取り外しに際し精度低下を招くことになる。ここでは、測定時の誤差要因を極力減らすために、オンマシンによる加工誤差自動測定システムを開発する。

旋削加工では径方向の精度が問題になることが多く、「2.2 旋盤の幾何誤差測定」で述べたように、レーザ寸法測定器を使用しても旋削加工時の加工誤差を測定することは可能である。しかし、測定できる工作物の寸法（直径）がレーザ寸法測定器の寸法に制限されるため、大きな寸法の工作物や正面切削など全ての形状に対応することは困難である。また、CNC旋盤の幾何誤差は1度測定しておけば頻繁に測定する必要は無く、切削現象による加工誤差のみを測定すれば良い。

本研究は、これらの点を踏まえ加工誤差の自動測定システムの開発をする。実際には、直動型の電気マイクロメータを一種の工具とみなして加工経路の仕上げ工程の経路と同じ経路で工作物の表面をトレースするような測定用NC命令を自動生成し、DNC運転をしながら加工誤差を自動測定する。測定システムはDNC運転¹⁰⁾、自動プログラミングシステム¹¹⁾とともに総合旋削システムITSYSに組み込まれ、自動プログラミングで使用する形状データを参照して自動的に測定用NC命令を生成する。前述のシステムで予め旋盤の幾何誤差を測定しておけば、旋削加工時の加工誤差は工作物の大きさや形状の影響を受けることなく測定可能である。この加工誤差データと旋盤の幾何誤差のデータを加工誤差補正機能に組込む。

5.3.2 測定用工具経路生成

加工誤差を測定する際、旋盤が幾何誤差を含んでいても移動する経路には加工時と同じ誤差が現れる。そのため、工作物表面に沿って刃物台上の測定子を移動させれば、旋盤の幾何誤差を含まない加工誤差だけが測定できる。自動測定は加工用NC命令生成システムと緊密な関係を持ち、工具経路を自動的に生成するための形状データが共通に利用される。形状データは、加工用NC命令に必要であり、共通データファイルに格納されているので、測定子の形状入力だけが追加項目となる。直動型電気マイクロメータを利用した測定子の形状は、測定子の半径 R 、支持部直径 B および角 θ で記述される。それにより、工作物の形状と測定子が干渉しないような測定用NC命令が自動

的に生成される。これはNC命令生成システムで工具経路を工具の刃先円中心で記述するのと同様な考えで処理される。

測定経路の生成概念を図5.18に示す。工作物上の P_{i-1} と P_i で示される区間 i に測定子があるとする。ここで P_i は工作物の形状を表す形状データである。測定経路は測定子の中心で指定するため、 P_{i-1} 、 P_i に対応し測定子の半径(R)をオフセットした点 Q_{j-1} 、 Q_j で示される区間を測定子が動くとき測定子の中心で動きを指定したことになるが、工作物の形状によっては測定子と干渉するおそれがある。干渉回避のために次のような処理をする。まず、 $Z(+)$ 方向については Q_{j-1} の Z 座標と $Q_l(1 \leq l \leq j-2)$ の点から $\theta/2$ に等しい角度で各点 Q_l を通る直線を引き、線分 $P_{i-1}P_i$ との交点で最小の Z 値のものを $Z_{\min(+)}$ とする(図5.18では、 Z_{j-2} がこれに相当)。同様に $Z(-)$ 方向についても考え、最大のものを $Z_{\max(-)}$ とする(図5.18では、 Q_j がこれに相当)。このとき、 $Z_{\max(-)} < Z_{\min(+)}$ の関係が成立しなければ、工作物の傾斜が急すぎるか、測定区間が短すぎることになり測定不可能と判断される。成立した場合、測定区間 i に関しては、測定子が Q_{j-1} と Q_j で示される線分上を $Z_{\min(+)}$ から $Z_{\max(-)}$ まで(図5.18の太点線)移動すれば工作物と衝突することなく測定ができる。この操作を全区間にわたって行えば工作物全体の測定経路が確定する。

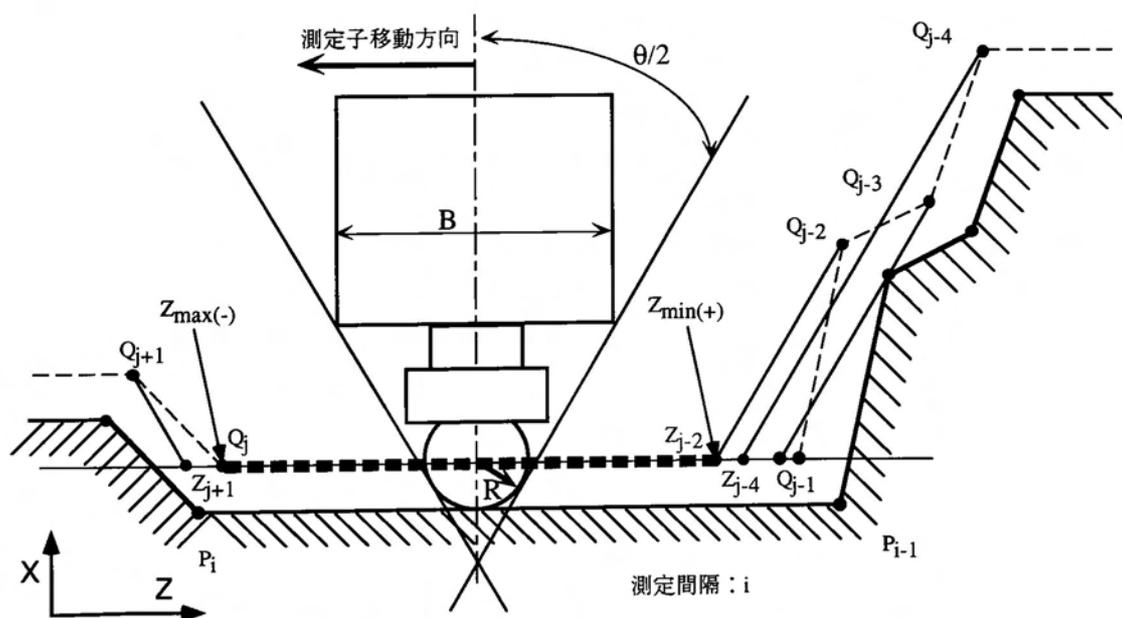


図5.18 測定経路生成法

5.3.3 ハードウェアおよびソフトウェア構成

図 5.19 にオンマシンによる自動加工誤差測定システムのハードウェア構成を示す。16ビットのパーソナルコンピュータを中心にA/D変換器、I/Oインターフェースを介して、CNC旋盤と直動式電気マイクロメータを接続したものである。一般のCNC旋盤は、マシニングセンタやNCフライス盤等と違い複雑形状を加工するにしてもそのステップ数は非常に少ないのでRBU (Remote Buffer Unit) を介したDNC加工は必要ない。そのため、NC命令を転送した後メモリ運転をする機能しかないため、NC装置とパーソナルコンピュータとの同期が取れず、測定子が測定点に達したかどうかの判断が出来ない。単純な円筒形状の測定では、刃物台の送り速度と、A/D変換器のサンプリング速度を合わせれば良いが、一般形状の測定は不可能である。そこで、CNC旋盤のシングルブロックモードを利用して双方の同期を取る装置を開発した。測定用NC命令は、NC装置に転送された後、メモリ運転のシングルブロックモードで実行を行う。実行はサイクルスタートボタンを押すことによって行われるが、ここでは、このボタンをパーソナルコンピュータのI/Oインターフェースを介したソリッドリレーで操作する。測定用NC命令の内容は予め分かっているので、G50 (座標系設定) やT606 (工

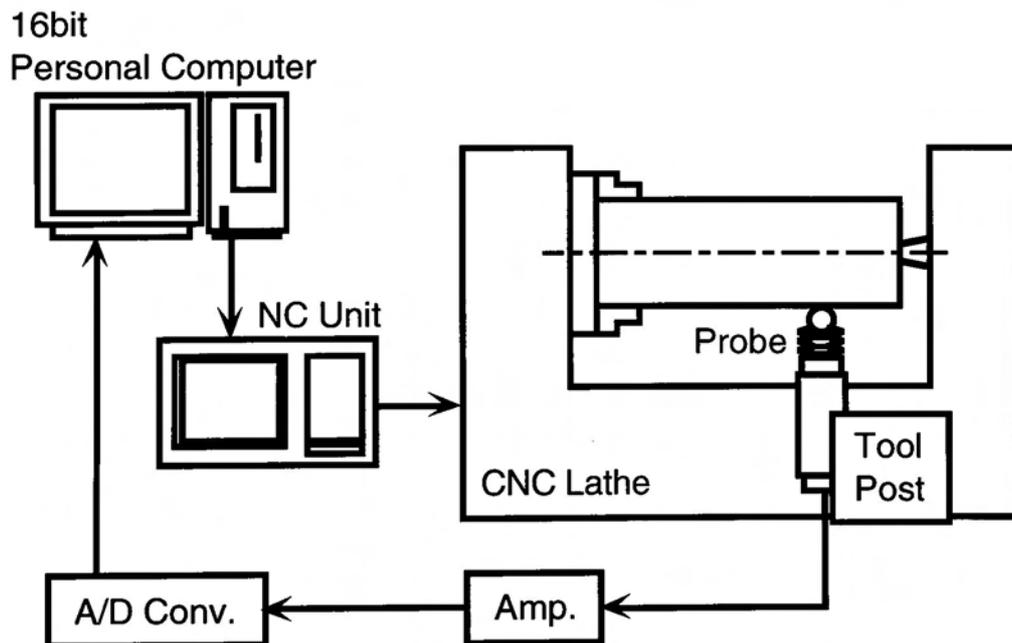


図5.19 加工誤差測定ハードウェア構成

具選択)などの初期設定命令は連続して実行する。測定点に入ると測定子からの信号をA/D変換器を介してパーソナルコンピュータに取り込み、それが終了すると再びリレーを動作させサイクルスタートボタンを押し次ぎの測定点へ移動する。これを全測定区間に渡って測定が終了するまで繰り返す。図5.20に以上のフローチャートを示す。

測定用NC命令の生成には工作物の仕上形状を表す形状データが必要になるが、既に自動プログラミングシステムで加工用のNC命令を生成する際、入力データとして与えられているので、ファイルから呼び出して使用する。さらに、工作物と測定子の干渉防止のために必要な測定子のデータ (B:測定子の最大径, θ :測定子の逃げ角) が入力される。測定経路の決定にあたっては、経路変更点区間 i ごとに工作物と測定子が干渉を起こさないような測定開始点と終了点が算出され、前区間の終了点から次の開始

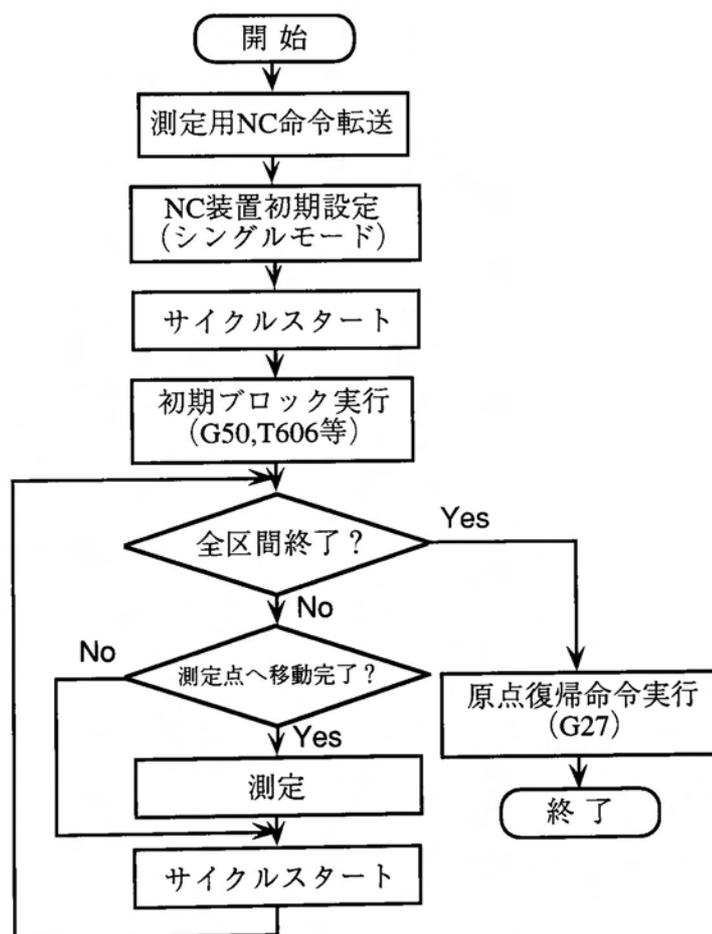


図5.20 自動測定用同期システムのフローチャート

点まで早送りで測定子を移動させるNC命令を生成する。このとき測定子が工作物と接触を保ったまま早送りさせると摩耗のおそれがあるので、工作物から退避させている。直線測定区間では、任意に測定出来るようにプログラムしている。一方、円弧部のある箇所では測定子と円弧部の接触状況で処理が複雑になり、測定の信頼性が乏しくなるため、その箇所は避けて通過するようにした。さらに形状が変化する点、すなわち形状変更点近傍では測定値が変動するおそれがあるので同様に接触を回避するNC命令を作成する。以上の処理が全区間にわたって繰り返された後、NC命令終了指令を付加し、測定用NC命令として保存する。

測定データは、測定開始時に工作物端で読み込んだ値と比較され、その差が加工誤差として求められる。データの収集が全区間にわたって行われるとCNC旋盤を止めて終了する。測定中は主軸を停止させておく。図5.21に図5.13で示した加工例の測定用工具経路シミュレーションを示す。図中の中心線の下部には、加工用の工具経路シミュレーションと同様に工作物の最終仕上げ形状が示される。工作物の最終仕上げ形

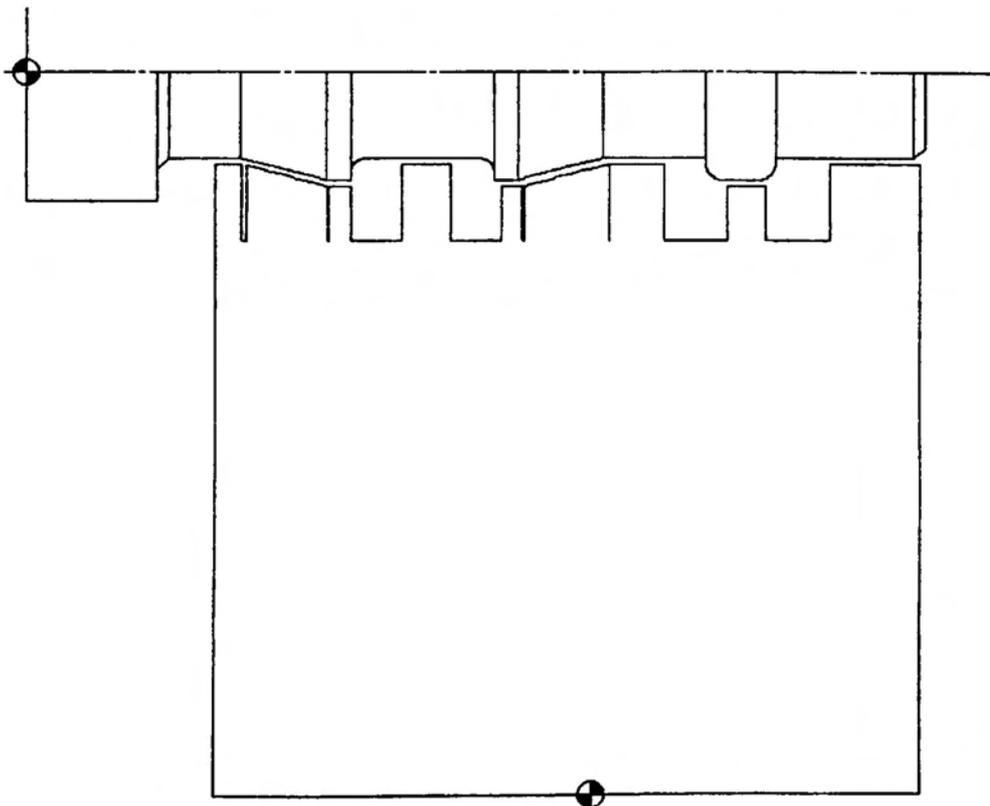
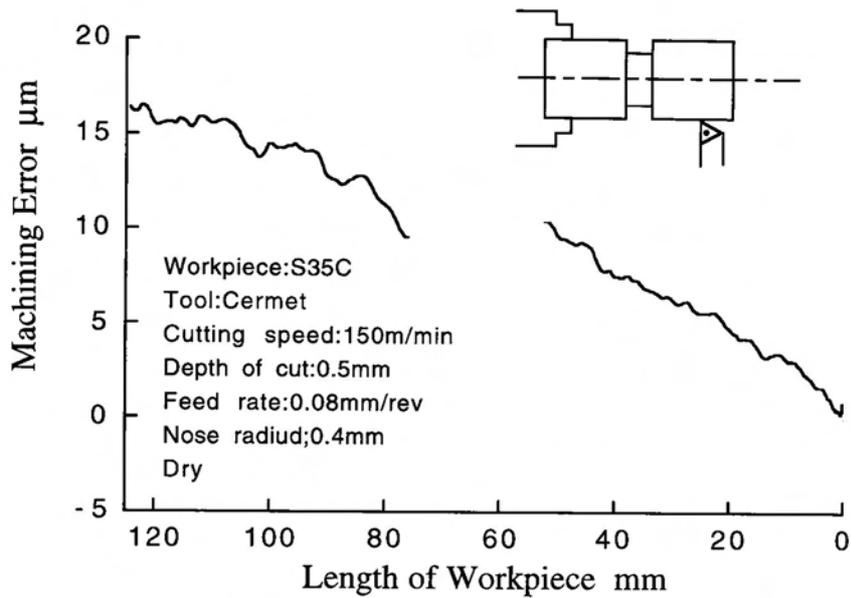
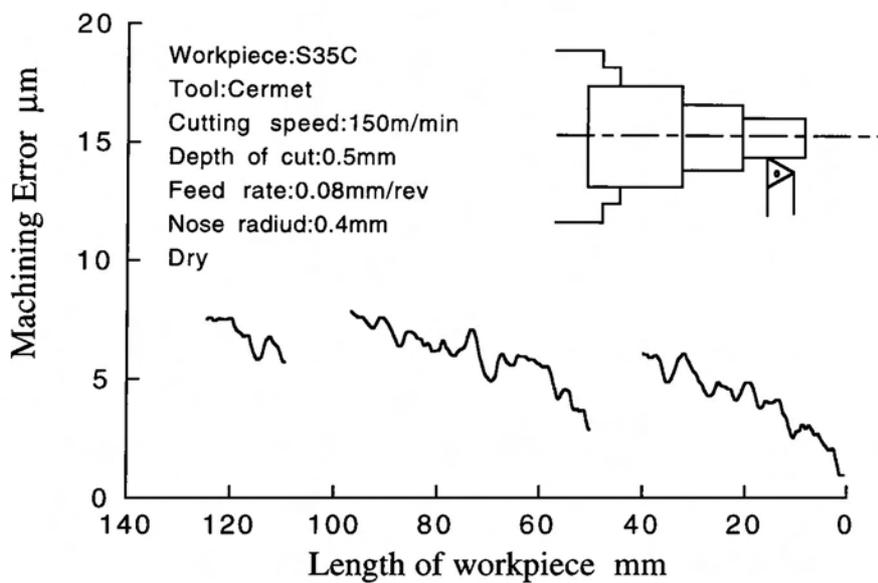


図5.21 測定経路シミュレーション

状を比較すると分かるように、円弧および形状が変化するところでは測定子が一旦工作物から離れて移動している様子がわかる。測定が終了すると、工具と見なされた測定子は、工具原点に復帰している。図5.21のような複雑な形状では、各測定区間が短いため、誤差測定例は溝付きの形状と段付き形状のものをそれぞれ図5.22(a), (b)に示す。加工条件は図中に示す通りで、横軸は右をセンタ側（切削開始点）とし、縦軸の



(a)溝形状を測定した例



(b)段付き形状を測定した例

図5.22 加工誤差測定例

加工誤差は測定開始点からの相対値とした。図5.22(a)の溝部分には測定子が入らないので測定していないためデータが存在しない。図5.22(b)についても同様で、形状が変化する部分については測定を行っていない。第2章で述べたように、加工誤差の主要因を工具熱膨張と考えると、溝形状、段付き形状ともに切削の進行に伴って工具熱膨張が大きくなり、工作物の径が減少している。また、切削が中断された部分では、工具が一旦工作物から離れるため工具が冷却され次の切削開始点では加工誤差が減少している様子がわかる。

5.4 加工誤差補正機能

5.4.1 データベース利用による誤差予測

加工誤差を補正するには、加工中に工作物の寸法を測定しそのデータを基に補正を加えるフィードバック方式¹²⁾がある。これを一般のCNC旋盤で行おうとすると加工誤差を測定する装置や工具の軌跡を変えるための機構が各工作機械毎に必要な等

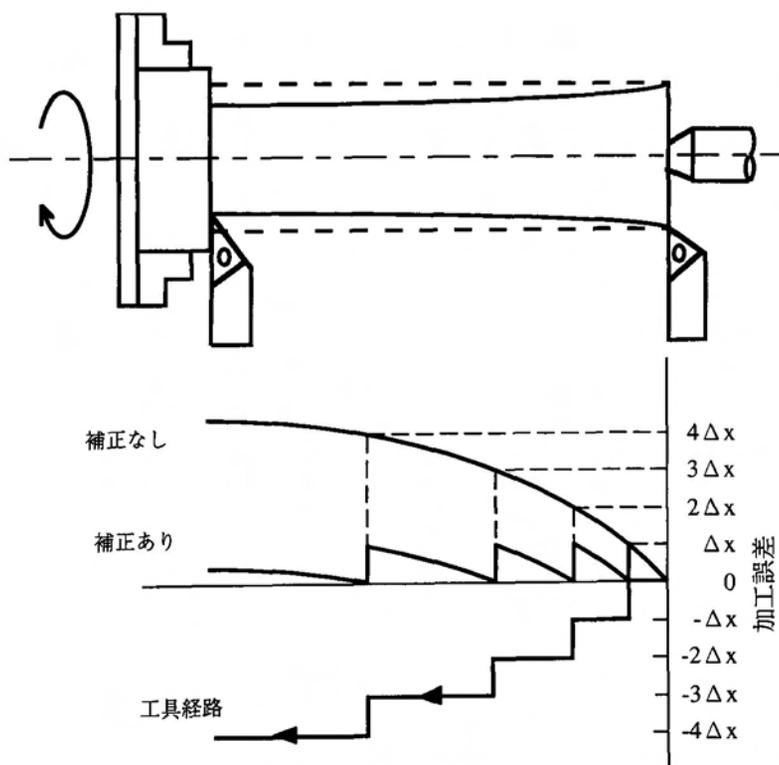


図5.23 加工誤差補正概念

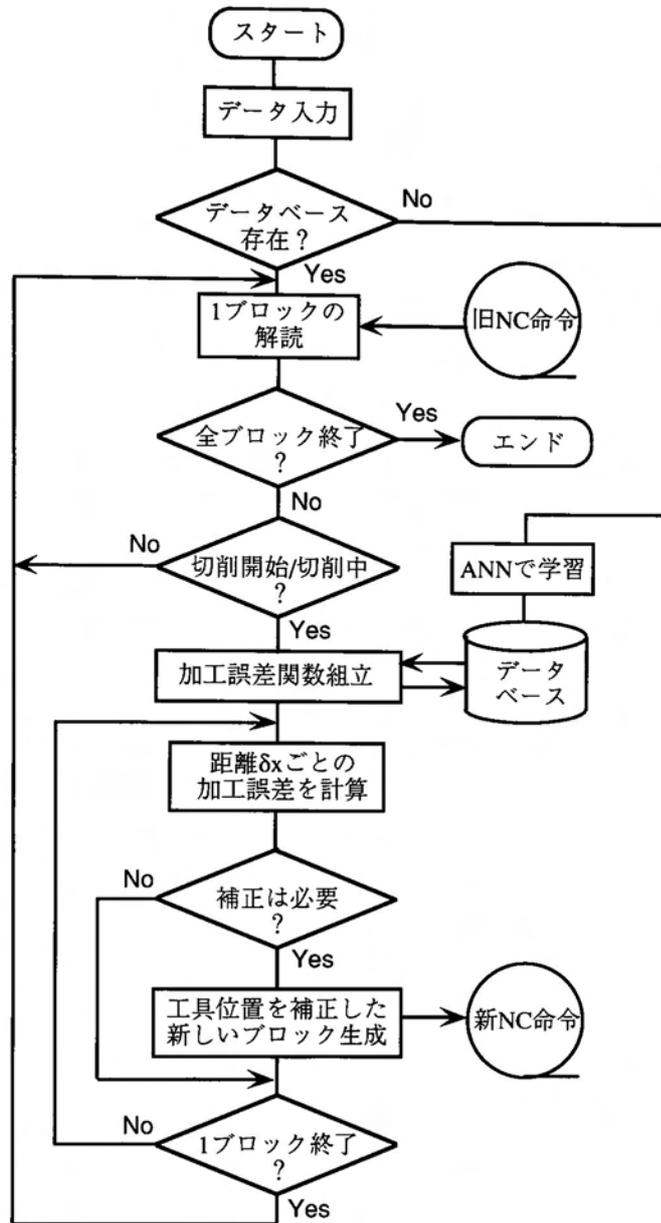


図5.24 補正プログラムのフローチャート

問題点が多い。本研究では、加工誤差を補正するための基本的な考え方は既に第3章で述べたとおりで、加工条件を基に計算機内で加工誤差モデルを構築し、その誤差を打ち消すようにNC命令を生成する。この補正システムはITSYSの自動プログラミング機能の仕上げ工程に適用される。図5.23に補正加工の概念を示す。図中の補正経路は補正加工しない場合の工具経路からの相対変位である。図5.24に補正加工用NC命令生成プログラムのフローチャートを示す。補正プログラム起動後、最初に全NC命令

のブロック数，加工条件等を入力する．入力された加工条件に対応する加工誤差のデータベース（簡易加工誤差近似関数の C_1 ， C_2 ）が存在しなければ，ANNによる学習を行う．次に，補正なしのNC命令の格納されているファイルから1ブロックずつNC命令を読み取り解読する．命令解読の結果，切削開始あるいは切削中ならば加工条件（切削速度，切り込み，送り）に応じて簡易加工誤差近似関数を作り，切削開始点から距離 δx ごとの誤差を計算する． Δx （CNC旋盤の最小設定単位）と比較して命令変更が必要ならば，その情報を含む新しいNC命令ブロックを生成しファイルに書き込む．これを全ブロックが終了するまで繰り返す．補正を要するブロック以外は，そのまま新しいファイルに保存される．

なお，本システムの補正機能はG01の直線補間だけであり，円弧切削やねじ切りなどには対応していない．これは，加工誤差自動測定システムでの誤差データの収集が困難なことや，円弧切削やねじ切りではそれぞれ固有のGコード（G02，G03，G33等）を使っているためである．

5.4.2 テーパー形状工作物の場合

補正機能の検証のために，まずテーパ形状の工作物について誤差補正を行った．現在市販されているCNC旋盤での，外周テーパ切削時には回転数一定指定（G97）また

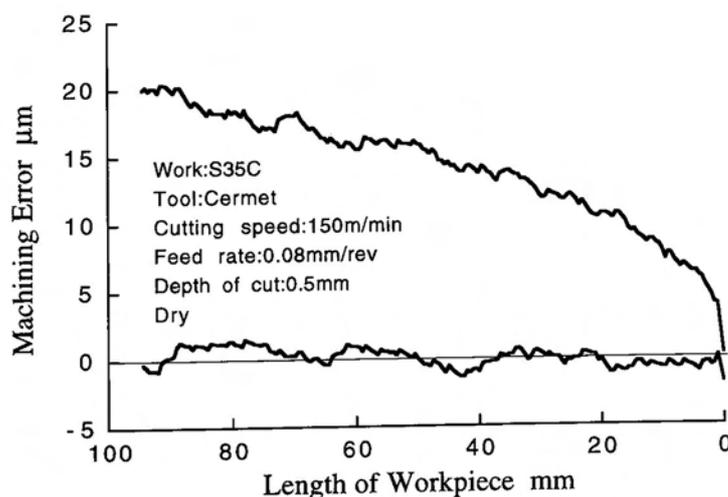


図5.25 テーパー形状の補正例

は周速一定指定 (G96) の選択が可能である。本システムでは、距離 δx (Z 軸方向) ほどの誤差を計算しているため周速一定制御を指定する。外周テーパ切削では、実切削距離 (実工具移動量) と簡易加工誤差近似関数の変数 X が一致しないため、式をテーパ面に投影したものに変換している。図 5.25 に外周テーパ形状切削の補正例を示す。図より $20 \mu\text{m}$ 程度あった加工誤差が $\pm 2 \mu\text{m}$ 程度に収まっている様子が確認できる。

5.4.3 溝および段付き形状工作物の場合

一般的な形状の外周旋削では、溝形状や段付き形状のように工具交換や形状変化に伴う工具離脱が存在する。ここでは、切削していた工具と工作物が離れ、再び切削する場合を想定し図 5.26 に示すような形状を考える。区間 B (溝部) では工具が自然冷却されるため、加工誤差は一旦減少するが、区間 C で切削が再開され加工誤差が再び増加する。ここで、区間 B を図 5.27 のように考える。(区間 C についても同様)

ここで、区間 B での誤差関数を $fb(x)$ とする。

$fa(x1) = fd(xi)$ となる xi を考えると

$$C1\{1 - \exp(-C2 * x1)\} = C1 * \exp(-C2 * Xi)$$

$$\{1 - \exp(-C2 * x1)\} = \exp(-C2 * xi) \dots (5.1)$$

となる

図 5.27 より

$fb(x) = fd(x - x1 + xi)$ なので、

$$fb(x) = fd(x - x1 + xi)$$

$$= C1 * \exp\{-C2 * (x - x1 + xi)\}$$

$$= C1 * \exp\{-C2 * (x - x1)\} * \exp(-C2 * xi)$$

$$= -C1 * \exp(-C2 * x) + C1 * \exp\{-C2 * (x - x1)\}$$

$$= C1\{1 - \exp(-C2 * x)\} - C1\{1 - \exp\{-C2 * (x - x1)\}\}$$

$$= f(x) - f(x - x1)$$

各区間での簡易加工誤差予測曲線は、次のようになる。

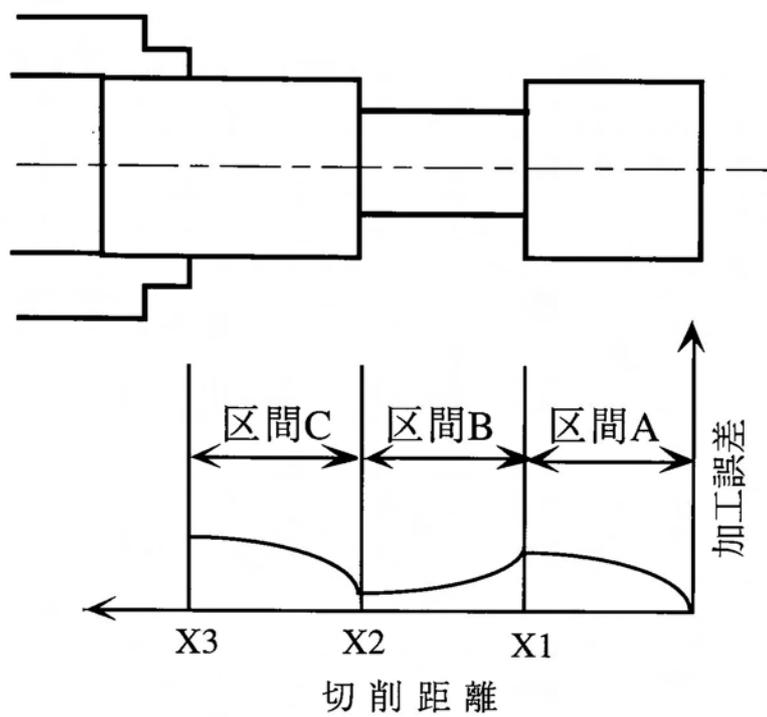


図5.26 冷却区間を含む加工誤差

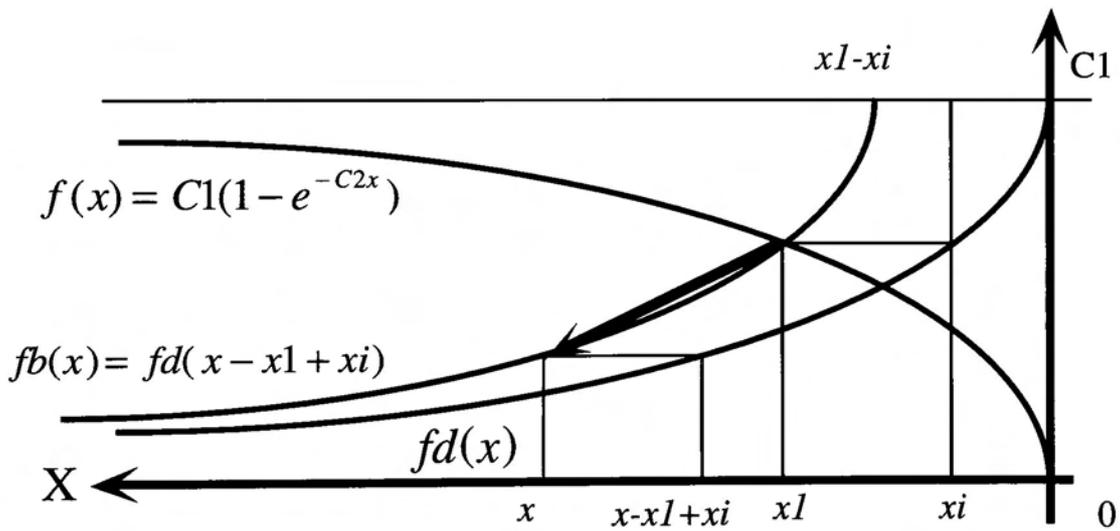


図5.27 工具冷却を含む加工誤差

- 区間 A $fa(x) = f(x) = C1 * \{1 - \exp(-C2 * x)\}$ $(0 \leq x \leq x1)$
- 区間 B $fb(x) = f(x) - f(x - x1)$ $(x1 \leq x \leq x2)$
- 区間 C $fc(x) = f(x) - f(x - x1) + f(x - x2)$ $(x2 \leq x \leq x3)$

この予測曲線を用いて図5.22(a)の溝付き円筒形状を補正した結果を図5.28に示す。さらに同様の考え方で図5.22(b)の段付き形状についても補正加工を行った。その補正例

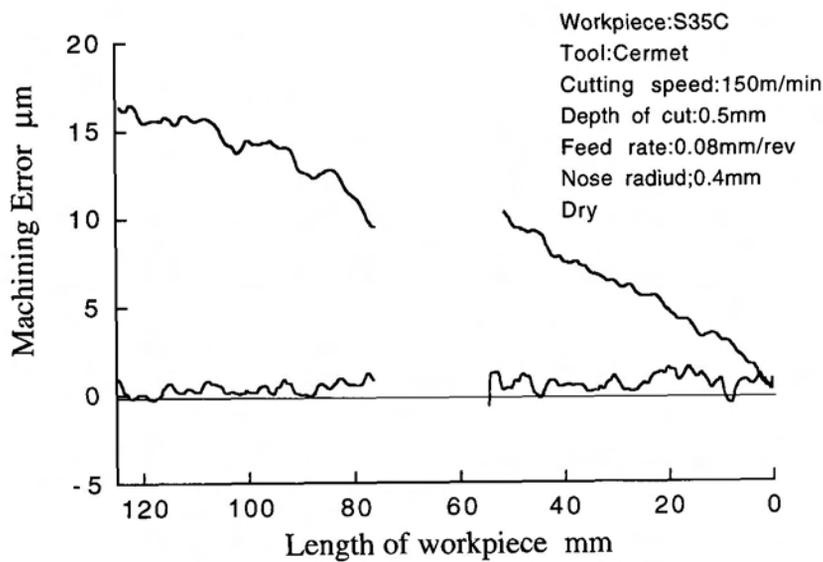


図5.28 溝付き形状の補正例

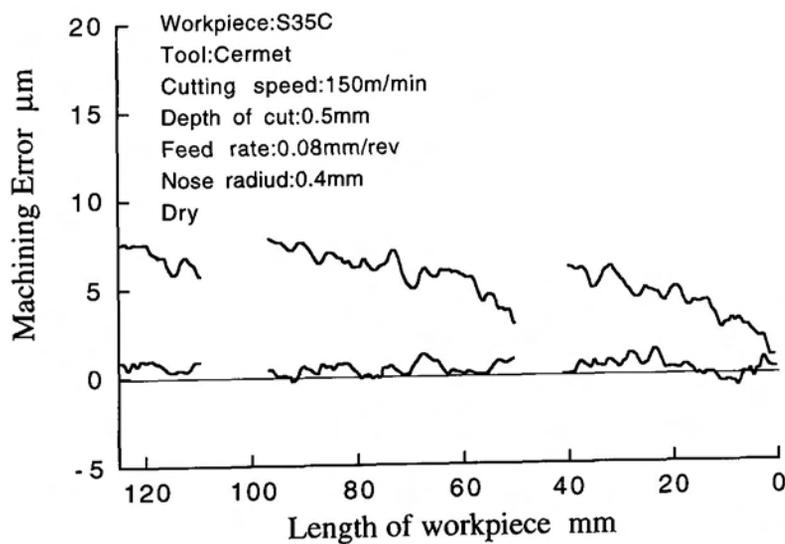


図5.29 段付き形状の補正例

を図 5.29 に示す。ここでは、工作物はたわみ等の影響が極力入らないように、 L/D を 3 以上にしている。一旦工具が工作物から離れ、工具が冷却され加工誤差が減少しているような形状の工作物に対しても補正が可能なことがわかり、本システムの有効性が確認された。

5.5 第 5 章のまとめ

本章では自動プログラミングシステム、オンマシンでの測定機能、加工誤差補正機能を含んだ総合旋削加工システムの開発を前提とし、システムの中核となる自動プログラミングシステムがどのような姿を有するべきかを検討し、従来の自動プログラミングシステム (APT) 等の特徴と問題点を論じた。更に、最小設定単位 $1 \mu\text{m}$ の CNC 旋盤での加工を前提とした二次元形状の工作物に限定した上で、新たに最終仕上げ形状を直線の交点とその形状パターンで表現する概念を導入した ITSYS を開発した。

ITSYS の自動プログラミングシステムでは、形状定義の際その入力のし易さを考慮してシステムを開発した。自動プログラミングシステムは以下のような特徴がある。

(1) 形状定義は全てを直線でモデル化し、そのとき出来る各直線の交点を座標値とすることで、パートプログラム方式を採用せず簡単なデータで形状定義を行う。その際欠落する円弧に関する情報は、7種類の形状パターンと呼ばれる情報とその半径で補う。これにより最小限の情報で形状定義が可能になる。

(2) 加工条件は仕上げ加工の切り込み、荒加工での切り込み、荒加工および仕上げ加工の切削速度、荒加工の送りを作業者が任意に入力可能である。しかし、予め用意されているデータベースを利用することも可能である。

(3) 使用工具は予め CNC 旋盤の刃物台にセッティングされている工具を自動的に選択する。

また、後の加工誤差補正のためのデータベース構築のためにオンマシンで加工誤差を自動測定するシステムも開発した。本測定システムは以下のような特徴がある。

(1) 加工終了後、工作物を CNC 旋盤に固定したままのオンマシン測定を行うことに

より、工作物の取り付け・取り外しによる測定誤差を最小限に抑えることが出来る。

(2) 加工終了後、切削した工具と同じ刃物台に固定された電気マイクロメータで仕上げ加工と同じ経路(一部測定子と干渉する箇所は除く)で測定することにより、CNC旋盤の幾何誤差を除いた加工誤差のみが測定できる。

(3) 測定用工具経路は、自動プログラミングシステムで定義された形状データから自動的に生成される。誤差測定時には、そのデータを基にパーソナルコンピュータとCNC旋盤は同期を取るDNC測定を行うため、正確な位置での測定が可能になる。

さらに、最終的に誤差補正のための加工誤差補正用プログラミングシステムを開発した。本システムは以下のような特徴がある。

(1) 加工条件を基に、簡単な指数関数を使った加工誤差モデルを構築し、その誤差がCNC旋盤の最小設定単位を越えるごとに加工経路を修正する。その修正されたNC命令で加工を行うフィードフォワード方式のため、補正がオンマシンで行え、工具経路や工具刃先位置を変更させるための余分な装置が一切必要ない。そのため、現有の工作機械が有効に利用される。

(2) 加工誤差予測曲線を組み合わせることによって、テーパ形状、段付き形状や溝付き形状等のより一般的な形状についての補正経路生成が可能になる。

ところで、加工誤差補正用プログラミングシステムは円弧形状やねじ切りについては対応していない。これは、自動プログラミングシステムでの円弧形状切削やねじ切りを単一のGコード(G02, G03, G33)で行っているためである。通常の加工ではこのように機械に依存した機能を使うことで精度の確保は可能であるが、精密加工の立場から考えると、球面静圧軸受のように円弧形状に対して高い精度を要求するような部品に対しては十分ではない。また、工作機械の送りねじ加工等についても同様のことが言える。これらを解決するためには、自動プログラミングシステムの工具経路生成と補正の基となる加工誤差を収集するための加工誤差測定自動システムを改良する必要がある。自動プログラミングシステムにおいては、三次元加工用CAMシステムと同様に円弧形状の切削に関しても、全て直線補間で経路を生成するように改造するこ

とで対応出来る。ねじ切りではねじ切削開始点を G33 命令（ロータリーエンコーダを利用した回転角検出）で制御しているため現在の NC 装置の構造上対応は不可能である。加工誤差測定自動システムでは、非接触式センサーを使うことで円弧形状やねじ部分には対応できるが、これらの機能を追加することにより、システムの負担が大きくなることが予想される。

第5章の参考文献

- 1) JIS B 6311：数値制御機械用符号（1974）
- 2) Douglas T. Ross & Clarence G. Feldmann: Papers of the APT language, Cambridge, Mass. : Massachusetts Institute of Technology(1960)
- 3) 松本博之：現場のNC入門（改訂版），ジャパンマシニスト社編集部，（1982）118.
- 4) 井上久仁子，本多庸悟：NC自動プログラミング・システムの動向，機械技術，29，2（1982）34.
- 5) 城道介，前田純一郎，武田健二，吉川弘之，佐田登志夫：旋削用自動プログラミングシステム STORK2 の開発，精密機械，38，1（1972）38.
- 6) 竹山秀彦，井上久仁子，本多庸悟，関口博，高田孝次：自動加工ソフトウェア，日刊工業新聞社（1981）151.
- 7) 湖東安行，井越昌紀：旋削用自動プログラミング・システム KKTS，精密機械，38，1（1972）33.
- 8) ターニングコンポ TC-2 ユーザーズマニュアル，瀧澤鐵工所
- 9) JIS B 6314：数値制御工作機械の準備機能（G機能）及び補助機能（M機能）の符号（1974）
- 10) 竹内芳美，坂本正史，池崎八生，末富昭：パーソナルコンピュータによるNC装置のDNC化，精密機械，48，6（1982）714.
- 11) 竹内芳美，坂本正史，井村公二，吉田隆一：パーソナルコンピュータによるNC装置のDNC化（第2報）-外周旋削用自動プログラミング機能の付加，精密機械，51，2（1985）353.
- 12) 例えば，白石昌武：旋削加工における工作物の寸法制御，精密機械，45，2（1979）208.

第6章 結論

近年の電子産業，情報産業，光学産業などで使用されている機器やその構成要素部品には，軽量・小型化・高寿命化の傾向にある．これに伴い各部品が高機能化し，作る精度もサブミクロンオーダーまたはナノメートルオーダーが要求されるようになってきた．さらに，生産個数や材質・大きさに制限があるものなど，ほかの条件が加わるとその作り方もそれぞれの要求に応じて異なりさらに難しさが増してくる．

本論文では，切削工程・計測工程において工学的な特徴を重視し，高品位な製品を加工するための旋削加工支援システムを開発することを目的とする．加工対象を最小設定単位 $1\ \mu\text{m}$ の CNC 旋盤，工作物材種を炭素鋼と限定した上で，高精度旋削加工システムを開発した．システムの中核となる加工誤差モデルおよび誤差測定法をはじめ，誤差補正システムの構築，さらにシステムを開発する際に使用している手法について述べている．

加工誤差モデルでは，エネルギー解析法や有限要素法¹⁾ などコンピュータを用いた解

析手法は使わず，実際の加工現象から実験的にその推定を行った．また，加工現象のみならず工作機械幾何的誤差についても注目し，これを測定・補正する手法について述べている．

誤差補正については，刃先を微小駆動させる装置や機械の改造等を行わず，現有の工作機械の機能を最大限に発揮させることを前提に，NCの最小設定単位を利用した補正方式とした．ここでは，最終的に制御する精度を表面粗さのオーダーと考えCNC旋盤の最小設定単位である $1\ \mu\text{m}$ と同等の加工品位を得るという立場を取っている．

加工誤差を補正するための加工は，加工する形状や工作物・工具の種類によって一様ではないため，これらを考慮した補正加工を行う必要がある．最終的な工作物の形状定義から補正加工までを，オンマシンで行うことにより，形状データから測定された誤差データさらには補正データまでを同じデータベース上で管理することが可能になる．これらの誤差データは，工作機械の幾何誤差データと加工現象による誤差データをそれぞれ個別に管理することができるため，より汎用性を持った高精度切削加工が期待出来るようになった．

6.1 本論文の要約

第2章では対象の工作機械を最小設定単位が $1\ \mu\text{m}$ のCNC旋盤に限定した上で，補正加工を行う際に必要な加工誤差要因を特定するために，旋削加工時に起こりうる加工誤差，特に工作物の寸法精度に影響を及ぼすものについて検討した．更に，全ての測定の際には工作物を旋盤から取り外すこと無く，かつ，測定器を全て工作機械上に設置し外部の基準を用いないオンマシンで行うシステム構成とした．

旋盤の幾何誤差をオンマシンで測定するための新たな測定システムを提案し開発を行った．このオンマシン測定システムは，次のような特徴がある．

- (1) JISに基づいた「旋盤の試験及び検査方法」での評価が可能で，通常，検査に必要なテストバーを必要としない．
- (2) 加工後の工作物外形を利用して測定をするため，工作物を取り外す必要が無い

ので、測定に際し取り外し・取り付けによる誤差を取り除くことが出来、高精度な測定が可能となる。

(3) 測定データから旋盤の幾何誤差を容易に計算することができ、さらに、旋盤の幾何誤差を取り除いた切削現象による加工誤差も容易に求めることができる。

工具摩耗が工作物の寸法精度に及ぼす影響を調べるために、工具の逃げ面摩耗を測定した。この測定された逃げ面摩耗幅から工作物の寸法精度に影響を与える刃先の切り込み方向の後退量を計算した。その結果、工具逃げ面摩耗幅の約10%が工具切り込み方向の後退量になる。通常、逃げ面摩耗幅が0.2mmになると精密切削における工具の寿命とされており、その時の工具切り込み方向の後退量は20 μ mになる。この数値は旋削加工の精度制御においては無視出来ない値である。しかし、工具逃げ面摩耗の進行は初期摩耗状態の後、定常摩耗状態が一定期間続く。その後、加速摩耗状態になり工具寿命を迎える。高精度加工を目指した精度制御では、定常摩耗状態で工具を使用するように工具の切削距離（切削時間）を管理すれば、1つの工作物を加工する間の工具摩耗は定常状態として考えることが出来る。

切削抵抗による工作物や工具のたわみを実験的に測定し、工作物の寸法精度に与える影響を調べた。測定された背分力から工作物を不静定はりと考えて切り込み方向のたわみを計算した結果、今回補正の対象としている最小設定単位1 μ mのCNC旋盤では考慮する必要がないことが分かった。また、切削抵抗による工具のたわみが工作物の切り込み方向に与える影響を、主分力による工具ホルダのたわみとして計算した結果、背分力の工作物に及ぼす影響と同様に考慮する必要がないことが分かった。

旋削加工中に発生する熱によっておこる工具熱膨張が、工作物の寸法精度に与える影響を調べるためにパイプ状工作物の二次元切削を行い、オンマシンで切削中の工具先端の伸びを実時間で測定した。その結果、加工の進行に伴い、最初は急激に伸びそれ以降は緩やかに伸びていることが分かった。この伸びは今回の実験条件のもとでは約15 μ m程度あり、工作物の寸法精度に大きな影響を与える。ここではこれを簡単な指数関数の形に置き換えることで、後の誤差補正に活かすことが出来る。

第3章では、旋削加工中に起こりうる加工誤差の精度をオンマシンで補正するために、CNC旋盤の最小設定単位（ $1\ \mu\text{m}$ ）を利用した予測制御方式による加工誤差補正を試みた。ここでは、基礎実験として円筒形状工作物の外周旋削加工に適用し以下の結果を得た。

(1) 旋削加工誤差を、二つの係数を使った簡単な指数関数で表現した。また、この係数は予め旋削実験を行いデータベースとして蓄えておくが、全ての加工条件に対してデータベースを用意しておくのは不可能である。そこで、データベースに存在しない加工条件については、人工ニューラルネットワークを用いてその推定を行い、CNC旋盤の最小設定単位近傍でその推定が可能であった。

(2) CNC旋盤において、最小設定単位である $1\ \mu\text{m}$ ごとの指令に対しても、刃物台の駆動、切削ともに確実に行われていることが確認できた。これによってオンマシンで加工誤差を補正することが可能であることを示した。

(3) 旋削加工誤差のデータベースを基に $1\ \mu\text{m}$ ごとに修正されたNC命令により、切削し、最大 $25\ \mu\text{m}$ あった加工誤差が $2\ \mu\text{m}$ 以内に補正され、CNC旋盤の最小設定単位に近い加工精度に旋削できる可能性を示した。

第4章では、旋削加工において最終的に到達出来る表面粗さについての検討を行った。「第3章」では、最小設定単位 $1\ \mu\text{m}$ のCNC旋盤を用いて最小設定単位近傍まで、加工誤差を抑えることが可能となった。しかし、これは既に表面粗さのオーダーに達しており、高品位な加工を行うためにはさらにこの表面粗さを向上させなければならない。高品位化のための補正加工では、微小切り込み、微小送りでの切削が必要になる。ここでは、送りが 0.05mm/rev 以下、切り込み 0.1mm 以下を微小切削として取り扱い、さらに高能率加工の観点から切削速度を 200m/min から落とさずに加工条件を設定した上で表面粗さに関する実験を行い検討した。また、工具・工作物は超硬工具、コーティング、サーメットと市販のスローアウェイチップを用い軟鋼（S35C）を切削した。微小切削範囲での切削実験を行い、以下の成果を得た。

(1) 長手方向切削で送りが 0.05mm/rev 以上の範囲では、送りを下げると表面粗さの

値は理論値と差はあるが、傾向はほぼ一致する。しかし、これ以下の送りでは逆に大きくなりその値もばらつきも大きくなる。また、非定常要素として工作機械の誤差や、切削機構による影響を防ぐための正面切削では、送りが0.05mm/rev以上の範囲で理論値とかなり良い一致をみたが、それ以下ではやはり、長手切削と同様の傾向を示した。

(2) 通常範囲の切削条件では、ノーズ半径が大きいほど理論式に従い表面粗さは小さくなるが、微小切削範囲では逆の傾向を示す。

(3) 工具材種による表面粗さの影響については、特にサーメット工具は他の超硬工具、コーティング工具に比べ耐摩耗性に優れ、鋼との親和性（構成刃先の主要因）も少ない。

(4) 切り込みは、理論的には表面粗さを決定するファクターではなく、事実通常の範囲では全く影響しない。しかし、微小切り込みの場合には送りが小さくなるのと同じ効果があり、微小送りの場合と同様の傾向を示す。

以上のことより、次の2項目に着目して表面粗さを改善するための対策を施した。

(1) 構成刃先の発生しない環境を創るために、切削油剤を用いて微小切削加工を行った。その結果、微小切削範囲では有効であることが確認された。

(2) 表面粗さは、理論的にはノーズ半径と送りで決定される。そこで、スローアウェイチップのノーズ部を落としたフラットノーズ工具を試作し、フラット幅よりも小さな送りで加工することで、理論的表面粗さ0を目指した。この工具を使った切削実験では表面粗さを0にすることは出来なかったが、フラット幅の寸法や送り設定によってはその効果が十分に期待できる。

第5章では自動プログラミングシステム、オンマシンでの測定機能、補正機能を含んだ総合旋削加工システムの開発を前提とし、システムの中核となる自動プログラミングシステムがどのような姿を有するべきかを検討した。加工対象の形状をCNC旋盤での加工とし、二次元形状の工作物に限定した上で、新たに最終仕上げ形状を直線の交点とその形状パターンで表現する概念を導入したITSYSを開発した。

ITSYSの自動プログラミングシステムでは、形状定義の際その入力のし易さを考慮

してシステムを開発した。自動プログラミングシステムは以下のような特徴がある。

(1) 形状定義は全てを直線でモデル化し、その各直線の交点を座標値とすることで、パートプログラム方式を採用せず簡単なデータで形状定義が可能になる。その際欠落する円弧に関する部分は、7種類の形状パターンと呼ばれる情報とその半径で補う。これにより最小限の情報で形状定義が可能になる。

(2) 加工条件は仕上げ加工の切り込み、荒加工での切り込み、荒加工および仕上げ加工の切削速度、荒加工の送りを作業者が任意に入力可能である。入力された加工条件が、微小切削の範囲内にある場合には切削油剤の利用やフラットノーズ工具の選択が可能である。また、予め用意されているデータベースを利用することも可能である。

(3) 使用工具は予めCNC旋盤の刃物台にセッティングされている工具を自動的に選択する。

また、後の加工精度制御のためのデータベース構築のためにオンマシンで加工誤差を自動測定するシステムを開発した。特徴は以下に示す通りである。

(1) 加工終了後、工作物をCNC旋盤に固定したままのオンマシン測定を行うことにより、工作物の取り付け・取り外しによる測定誤差を最小限に抑えることが出来る。

(2) 加工終了後、切削した工具と同じ刃物台に固定された電気マイクロメータで仕上げ加工と同じ経路(一部測定子と干渉する箇所は除く)で測定することにより、CNC旋盤の幾何誤差を除いた加工誤差のみが測定できる。

(3) 測定用工具経路は、自動プログラミングシステムで定義された形状データから自動的に生成される。誤差測定時には、測定用のNC命令を基にパーソナルコンピュータとCNC旋盤は同期を取るDNC測定を行うため、正確な位置での測定が可能になる。

6.2 今後の課題

本研究で開発した高品位旋削加工システムは、CNC旋盤の最小設定単位を利用しオンマシンの特徴を活かした誤差測定(切削現象による加工誤差とCNC旋盤の幾何誤差を分離して測定可能)、自動プログラミングシステム、誤差補正機能を備えている。し

かし誤差測定システムでは、三次元的に存在するCNC旋盤の誤差についても考慮すべきである。自動プログラミングシステムについては、球面静圧軸受の加工などを考慮して、CNC旋盤自体の円弧補間機能を使わず直線補間でプログラミングすることも、高品位加工の立場から考えると重要である。

また、本研究では加工誤差近似関数の係数を推定するために、切削速度、切り込み、送りをパラメータとしたが、実際にはより多くのパラメータ（工作物材種、工具材種・形状、切削油剤の有無等）が存在する。そのため、より多くのパラメータで推定を行った場合に関する理論的・実験的な検証が必要である。

今後はこれらの問題点を念頭に置き、その解決を図って行きたい。

第6章の参考文献

- 1) 例えば, 臼井英治:現代切削理論-コンピュータ解析と予測システム-, 共立出版株式会社 (1990) 107.

謝 辞

本研究を行うにあたり、懇切なご指導をいただきました九州工業大学工学部 水垣善夫教授、適切な御助言をいただいた同大学工学部中島克洋教授、兼田楨宏教授、同大学情報工学部鈴木裕教授に厚く御礼申し上げます。また、適切な示唆をいただきました北九州高等工業専門学校坂本正史校長、電気通信大学電気通信学部竹内芳美教授に深く感謝申し上げます。

また、実験を行うにあたりご協力をいただいた、九州工業大学工学部郝明暉助教授、寶亀真澄技官、およびご協力いただきました同大学工学部機械実習工場、生産加工研究室の諸子に感謝の意を表します。

最後に、深甚なる感謝の念とともに、本論文を両親及び浅尾自子に捧げます。

平成10年12月