

博士論文

工具カタログからのデータマイニングに
支援されたものづくりシステムに関する研究

2013 年

児玉 紘幸

目次

第1章 緒論.....	1
1-1. 研究の背景および目的.....	1
1-2. 本論文の構成.....	4
第2章 工具カタログデータの非階層・階層クラスタリングの併用効果.....	6
2-1. 緒言.....	6
2-2. データマイニングの基本と工具カタログデータ.....	6
2-2-1. カタログマイニングプロセス.....	7
2-2-2. 非階層・階層クラスタリング手法.....	8
2-2-3. 非階層・階層クラスタリング手法の併用効果.....	13
2-2-4. 製造分野におけるカタログマイニングの効果.....	13
2-3. 解析結果と考察.....	14
2-3-1. 原データの取得.....	14
2-3-2. 工具形状による分類.....	15
2-3-3. 形状を代表する変数の選択.....	17
2-3-4. 導出された切削条件式の妥当性の検討.....	19
2-4. 結言.....	22
第3章. 自明な工具パラメータを除いたマイニング手法の提案.....	23
3-1. 緒言.....	23
3-2. カタログマイニングプロセス.....	24
3-3. エンドミル外径 D を固定した場合のカタログマイニング.....	25
3-3-1. 工具カタログデータと固定するエンドミル外径.....	25
3-3-2. 工具形状による属性抽出.....	25
3-3-3. 変数クラスタ分析と主成分回帰による知識抽出.....	26
3-3-4. 切削条件決定行列式の導出.....	29
3-4. 導出された切削条件決定行列式の考察.....	30
3-4-1. 対象とする工具形状.....	30
3-4-2. 導出された切削条件の考察.....	32
3-4-3. 切削可能な領域線図の提案.....	33
3-5. 結言.....	35

第4章. 粗加工用切削条件決定支援システムの提案.....	37
4-1. 緒言.....	37
4-2. カタログマイニングプロセス.....	38
4-3. カタログマイニング結果および考察.....	40
4-3-1. 工具形状によるモデル化とクラスタリング.....	40
4-3-2. 工具形状パラメータからの説明変数抽出.....	41
4-3-3. 切削条件決定行列式の導出.....	44
4-4. 切削実験による切削条件決定行列式の妥当性の検討.....	45
4-4-1. 切削条件と実験に用いた工具.....	45
4-4-2. 実験方法および加工形状.....	46
4-4-3. 実験結果および考察.....	49
4-5. 結言.....	50
第5章. LCAによるエンドミル加工条件の環境負荷低減技術.....	51
5-1. 緒言.....	51
5-2. 切削条件と実験手順.....	52
5-3. 実験計画法.....	55
5-4. 工具寿命実験.....	58
5-5. 切削時の消費電力測定実験.....	61
5-6. 環境影響評価.....	65
5-6-1. 概念.....	65
5-6-2. 評価指標.....	65
5-6-3. LCA フローおよび累積環境負荷計算結果.....	65
5-7. 最適切削条件の導出と各切削条件の影響評価の比較.....	68
5-7-1. 習熟曲線を適用した環境負荷指標モデル.....	71
5-8. 結言.....	73
第6章. 難削材加工用の切削条件決定支援システムの提案.....	74
6-1. 緒言.....	74
6-2. カタログマイニングシステム.....	76
6-3. ターゲットデータ.....	77
6-4. カタログマイニング結果および考察.....	77
6-4-1. 工具形状によるモデル化とクラスタリング.....	77

6-4-2. 切削条件決定に有意となる説明変数の選択.....	78
6-4-3. 切削条件決定式の導出.....	79
6-5. ケーススタディ①.....	81
6-5-1. 切削条件と実験概要.....	81
6-5-2. サーモグラフィ赤外線画像の取得方法.....	82
6-5-3. モニター画像と工具温度.....	84
6-5-4. エンドミル加工中の工具温度の変化.....	85
6-5-5. 工具温度と加工能率の関係.....	86
6-5-6. 工具温度の評価制度の検討.....	87
6-6. ケーススタディ②.....	89
6-6-1. ターゲットデータの取得.....	89
6-6-2. 工具形状のモデル化と相当刃長 l_e の定義と提案.....	90
6-6-3. 切削条件決定に有意となる説明変数の選択.....	92
6-6-4. 切削条件決定式の導出.....	94
6-6-5. 指針となる切削条件の導出.....	95
6-7. 結言.....	98
第7章. ボールエンドミル切削条件決定支援手法の提案.....	100
7-1. 緒言.....	100
7-2. カタログマイニングプロセス.....	102
7-2-1. スクエアおよびボールエンドミルの差異.....	103
7-2-2. K-means 法による属性抽出のための新たな変数の導入.....	104
7-2-3. K-means 法による非階層クラスタリング結果と考察.....	106
7-2-4. 非階層クラスタ内の有意な変数の選択手法.....	107
7-2-5. 応答曲面法による切削条件決定式の導出と考察.....	109
7-2-6. カタログ推奨値とマイニング導出式の関係.....	110
7-3. ケーススタディ.....	112
7-3-1. 使用した切削条件および工具, 被削材.....	112
7-3-2. 実験方法.....	112
7-3-3. 実験結果と考察.....	113
7-4. 結言.....	115
第8章. 結論.....	116

参考文献.....119

謝辭

第 1 章

緒 論

本章では、まず本論文に関する研究背景と、データマイニング手法の一般的な定義および工学分野での応用例, 研究概要を述べることにより, 本研究の目的を明らかにする. さらに, その目的を達成するための本論文の構成および概要を述べる.

1-1. 研究の背景および目的

顧客の要望を満足するため, 工業製品はその形状や使用目的, 材質など多岐にわたり, それにともなってより複雑な設計がなされているのが現状である. 多くの工業製品は CAD (Computer aided design) によって寸法形状が設計され, CAM (Computer aided manufacturing) によって所望の寸法形状を創生するまでの工具パスが NC (Numerical control) プログラムとして出力される. 日本の現場の技術において, これらのプロセスは熟練技能者でなくてもある程度の知見があれば比較的簡単にかつ自動的に実行される. そのようにして出力されたプログラムは NC 工作機械に入力され, 様々な形状や目的を有する工具とそれを保持するホルダー, さらに被削材を固定するジグを用いた加工による形状の創成がおこなわれる. 近年の CAM システムでは, 非熟練技能者でも比較的簡単に NC プログラムとして工具パス (図形の形状といった幾何学的な情報) が作成できるように進化してきたことは前述したが, 加工に使用する工具の切削条件 (例えば, 主軸回転数 S rpm, テーブル送り速度 F mm/min, 切り込み量 mm などの運動学的な情報) は自動決定できない. すなわち, NC 工作機械の運動学的な指令の決定は, 熟練技能者の暗黙知的な経験や知見に頼っていることが多く, 一般的に体系立てられていないので, 非熟練技能者がそれらを受け継ぐのに長期間を要する. さらに, 日本国内の熟練技能者の数は, 少子高齢化や他国企業への引き抜きなどに伴い, 年々減少しているという問題もある¹⁾. 図 1-1 に示すように, 工具の切削条件の決定には, 加工する被削材料の材料特性や, 加工形状, 工具を保持するホルダーの突き出しの剛性や, 工具自身の材質, 刃部の形状, コーティングの種類, 工作機械の剛性など, 多岐にわたる条件をそれぞれ考慮して決定する必要がある. 最終的にその切削条件如何により, 工具の摩耗状況が変化し, 要求精度の確保が困難となったり, 製品の作成に係るコストや納期に大きな悪影響を与える. また, 切削時の工作機械や工具の製造, 廃棄にともなう消費電力などを考慮すると製造に伴う環境負荷にも大きな影響を与える²⁾. そのことから, 環境負荷も含めたこれら各条

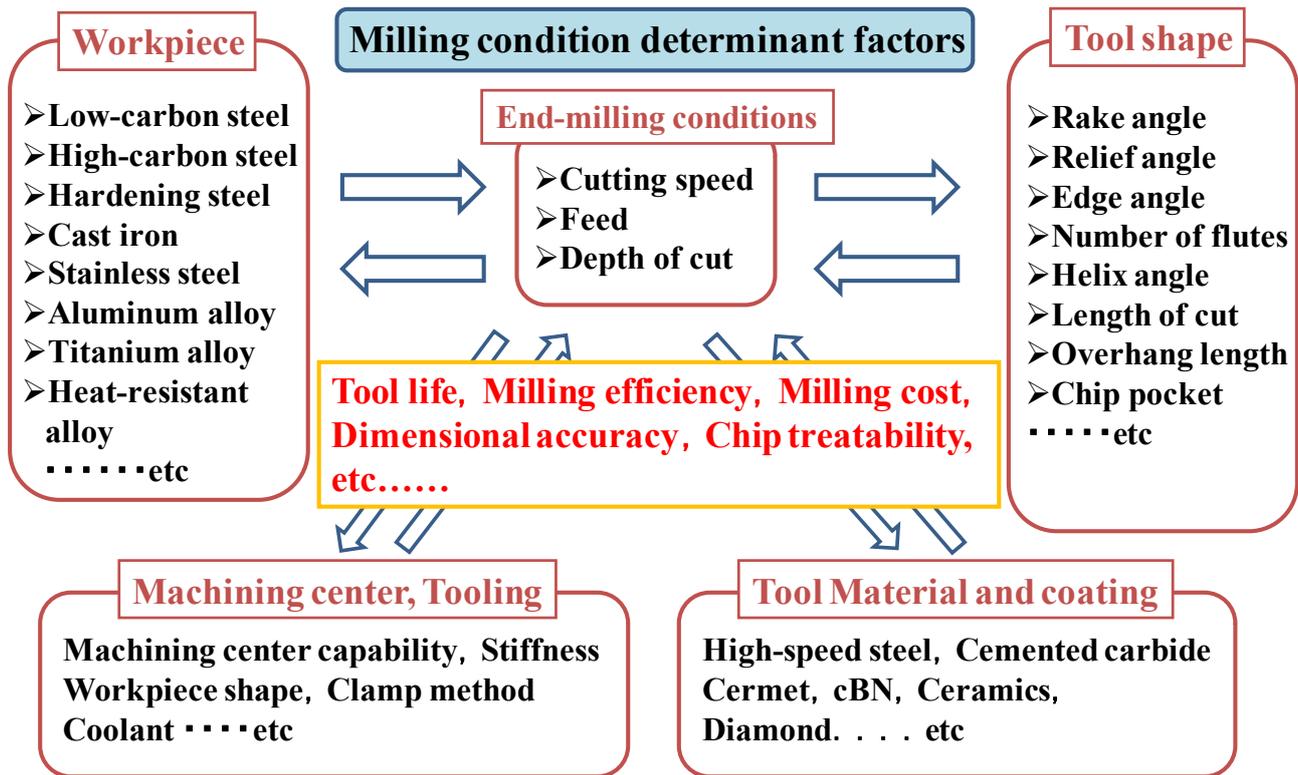


Fig. 1-1 Considerable elements of appropriate milling conditions

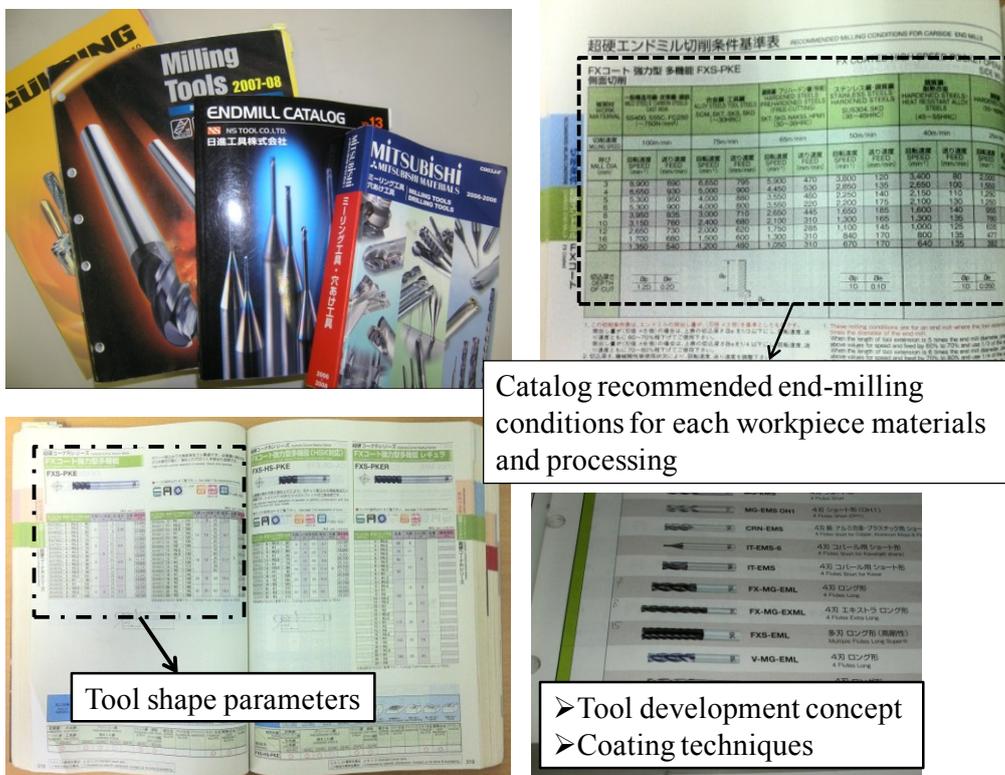


Fig. 2-1 Outline of end-mill catalog data

件を考慮した最適な切削条件や工具形状, 加工方法の決定が次世代のものづくり技術発展に寄与する重要な課題である. 特に, 切削に関する知見の浅い非熟練技能者にとって, 最適な切削条件の決定は難しく, それらの決定には試行錯誤的な切削実験を要する場合が多く, 相当な時間や被削材料, 工具, 労働力を無駄にしてしまうことの解決が不可欠である. したがって, 工具や切削条件の決定を支援するシステムを構築していくことで設計から製造までのプロセスを合理化することができると考えられる.

ここで, 非熟練技能者は, 図 1-2 に示すように, 工具カタログに記載されている切削条件推奨条件表をもとに, 条件設定を行なうことが多い. しかしながら, カタログは工具メーカーの工具に対する膨大な知識を集めた加工技術に関する大規模データであるため, 工具形状や被削材によって条件が多岐に渡ることから, 条件設定に時間がかかり非効率である. またそのようなデータベースを単に参照データとして用いるのではなく, 熟練技術者の有する, 暗黙知的な切削条件決定に関する知識が集約された情報源として扱うことで, そこから切削条件決定に有意な知見を抽出していくことが可能であると考えられる. 保存された大規模データから, 科学的に価値のある新しい知識やパターン, 関係性を抽出できるデータマイニングと呼ばれる手法が開発され広範囲に研究が行われてきた³⁾⁻⁵⁾. 数々の統計解析的な手法によって構成されるデータマイニング手法はこれまで, 製造学⁶⁾⁻⁹⁾, 医学¹⁰⁾, 化学¹¹⁾⁻¹²⁾, 経営学¹³⁾⁻¹⁴⁾ (特にマーケティング) 等の分野に適用されて, その効果が実証されてきている. データマイニング手法の発展により, 数々の知識発見システム, すなわち KDD (Knowledge-discovery in database) システムが提案されてきた¹⁵⁾. KDD システムとは, 数々のパラメータが複雑な相関関係を有するような大規模データ (例えば POS データや株価, 消費者アンケート結果など) から有益な知識発見を行うまでの全体のプロセスを示すのが一般的である. KDD システムは大きく二つのカテゴリーに分割できる, すなわち, KDSEs (Knowledge-discovery support environments) と KDA (Knowledge-discovery application) である. KDSEs とは 1 つかそれ以上のデータマイニング技術を提供できるようなシステムと定義がされている. 一方で, KDSEs による出力結果が, 発見までのプロセスアプリケーションとして特定できることを, KDA と定義している. 特に製造分野において, 多くの研究成果により KDD システムの発展が推進されてきており, プロセスレベルでの応用例¹⁶⁾⁻¹⁸⁾として, 製造現場の機器メンテナンス頻度の予測や, 欠陥の発見, 設計, 製造, 品質保証, スケジューリングなどの意志決定支援システムに応用可能な知識を抽出することができるようになった. しかしながら, CAD/CAM, 工作機械に係る切削条件決定支援を行うための研究はなされていなかった.

そこで本研究では、工具メーカーの長年の知識や経験が含まれた膨大な情報を有する工具カタログデータに注目し、データマイニング手法を適用することを試みた。ひとつの KDD システムとして、これまで気付かなかった切削条件決定に関する新しい知識を発掘するカタログマイニングシステムを提唱することによって、切削加工の中でも代表的に用いられるスクエアエンドミル、ボールエンドミルに対して、金型鋼や他の推奨条件の導出し難い未知材料、難削材料でも非熟練技能者にとってある程度指針となる切削条件が決定可能な支援システムを構築する。さらに提案するカタログマイニングシステムの適用による製造工程における地球環境への影響評価も遂行する。

1-2. 本論文の構成

本論文は、本章を含めて全 8 章から構成される。その構成および概要は以下の通りである。

第 1 章は、本章であり、研究の背景と目的、そして本論文の構成と概要について述べている。

第 2 章では、超硬スクエアエンドミルを対象とした、数的データに最適なデータマイニング手法の提案と、スクエアエンドミル刃部形状に注目した条件変数の設定法について提案する。また、非階層・階層型クラスタリング手法を併用した切削条件決定に有意な変数の抽出法を提案し、その効果を各手法について定量的に考察し、その併用効果を明らかにしている。

第 3 章では、新しいデータクレンジング手法の 1 つとして、前章の成果で導出された切削条件決定に自明な変数（工具外径 D 、本例では $\phi 10$ mm）を固定する手法によって、切削工具メーカーごとの切削条件設定の特徴の抽出を試みを提案する。それらにより、カタログマイニングによって導出された切削条件決定式は単にカタログ値を予測する精度を扱うのではなく、工具寿命重視または加工能率重視など、切削条件を変更しようとする際に重要な指針となることを証明できることがわかった。また、導出されたマイニング条件がカタログの推奨する切削条件域において、どの程度の実用性を有するのかを視覚的に判断できる切削条件域のモデル化についても述べている。

第 4 章では、2 章で提案したカタログマイニングシステムによって導出されるスクエアエンドミル切削条件の有用性を、焼き入れした金型鋼 JIS SKD61 のラジアスエンドミルを用いた高速切削加工に適用することによって評価した。比較対象として、カタログに記載されている推奨条件および熟練技能者が試行錯誤的な切削条件によって導出した熟練技能者推奨条件を用いた。その結果、カタログマイニングによって導出された切削条件の現場における

有用性を明らかにしている。

第 5 章では、環境への影響を定量的に評価する手法である LCA (Life cycle assessment) を用い、第 3 章で比較対象として用いた、カタログが推奨する切削条件、マイニングによって得られた切削条件、熟練技能者が推奨する切削条件を環境負荷の観点から評価することによって、試作レス金型加工を実現できる環境負荷予測モデルの構築を行った。その結果、習熟度曲線を考慮することにより、マイニング条件を用いることで初期段階の時間や工具、電力消費を削減することができ、環境負荷の観点からも有効であることを示している。

第 6 章では、提案したカタログマイニングシステムを、近年の航空機製造の急増によってニーズの増してきたチタン合金や、オーステナイト系ステンレス鋼、超耐熱合金に代表される難削材と呼ばれる材料に適用した、難削材カタログマイニングシステムを提案している。そこから導出されるマイニング条件の有用性を、熟練技能者が導出した熟練者条件を比較対象として実験的に検証し、難削材カタログマイニングによって、工具カタログが推奨する切削条件決定に関する有意な変数を効果的に抽出することが可能であることを示した。また、不等ピッチ、リードエンドミルに代表される切削中の再生びびり振動が抑制可能な難削材加工に特化したエンドミルに対して、刃部の特徴を定量化することにより効果的なクラスタリングが可能となる手法も提案している。

第 7 章では、ボールエンドミルを対象とし、金型の自由曲面加工のための切削条件決定支援システムの提案を行った。K-means 法において、ボールエンドミルの刃部の正味長さを数学的に近似計算することにより、効果的にクラスタリングできることを示している。また、ボールエンドミルカタログマイニングによって導出された切削条件の有用性を評価するため、カタログに記載されていない推奨条件が未知の材料（ここでは金型用焼き入れ鋼 DH31S）でも、迅速かつ効果的に実用的な推奨条件の導出が可能であることを明らかにした。

第 8 章では、本研究で得られた成果を統括している。

第2章 工具カタログデータの非階層・階層クラスタリングの併用効果

本章¹⁹⁾²⁰⁾では、非熟練技能者を対象に切削条件や使用工具形状（直径，全長，刃長，刃数）の選定を支援するために，工具カタログデータに，階層・非階層型のクラスタリング手法を適用することで，切削条件決定を支援できるシステムの提案を行う．また，これらのデータマイニングプロセスにおいて新知識の発掘を目的とする．非階層型のクラスタリング手法である K-means 法によって工具カタログから形状ごとにクラスタ分けし，その各形状クラスタに対して，階層型の変数クラスタ分析によって有意な変数を選択し，分析した結果に基づいて切削条件を決定できる実用式を導出して考察した．

2-1. 緒言

近年の CAM システムの発達により，幾何学的な情報に関しては，熟練技術者でなくても容易に NC プログラムを生成することが可能となった．しかし加工をする上で重要な使用工具や運動学的な切削条件の決定は，熟練技術者の知識や経験に頼っているのが現状である．しかし，熟練技能者の知識や経験は，暗黙知である場合が多く非熟練技能者には伝承されにくい．したがって，公開されている知識やデータを活用して，使用工具や切削条件の決定を支援する新しいシステムを構築していくことが必要であると考えられる．ここで，工具カタログは工具メーカーの工具に対する膨大な知識を集めた加工技術の宝庫であるため，良質なデータベースであるといえる．そこで，本章では膨大なデータを有する工具カタログに対して，データマイニング手法を適用した切削条件決定支援システムを提案している¹⁹⁾⁻²¹⁾．ここで，データマイニングとは，データベースに蓄積された膨大なデータから背景知識では気付かなかった価値ある情報を発掘する新しいデータ解析方法である²²⁾．そこで本章ではスクエアエンドミルを対象にした工具カタログデータに，非階層型と階層型のクラスタリング手法を併用し，その効果を明らかにする．

2-2. データマイニングの基本と工具カタログデータ

データマイニングの基本は，有益なパターンやルールあるいはノイズを含むデータベースに蓄積された膨大なデータから，価値ある情報を発掘する方法のことである．近年ではさまざまな分野で用いられており，一部で製造システムへの応用も試みだされている²³⁾．価値

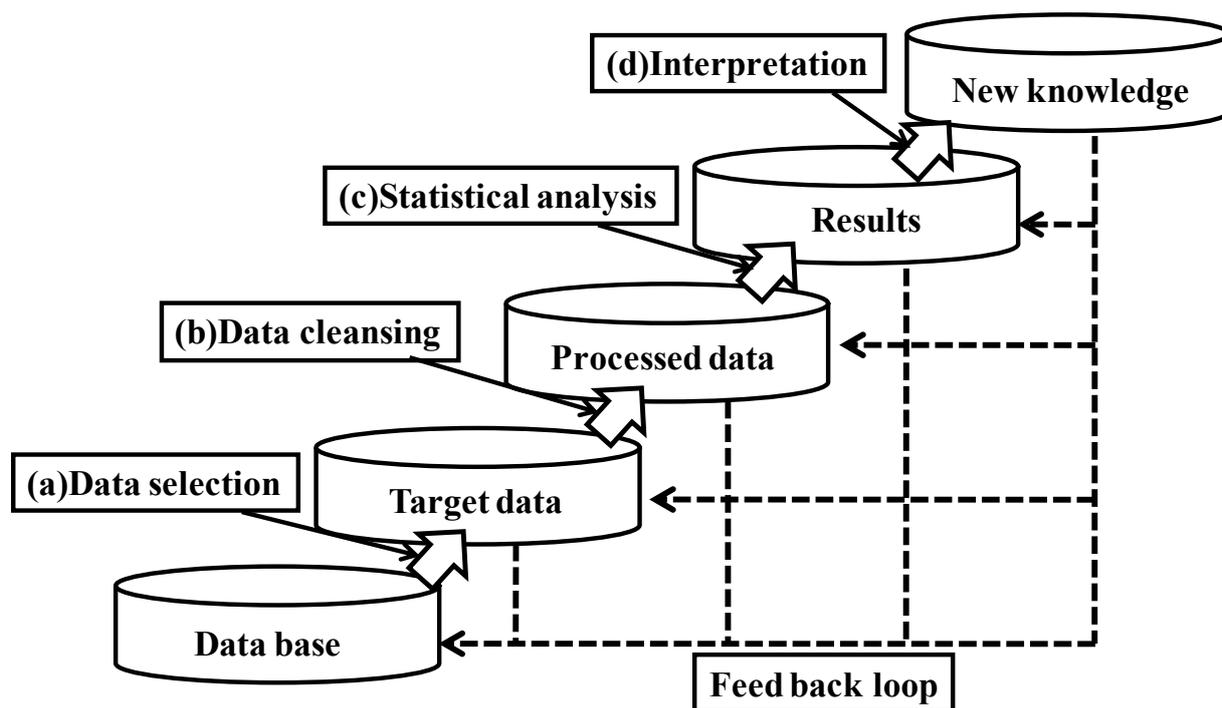


Fig. 2-1 Typical data-mining flow

ある情報の発掘を行うには、データクレンジングを行い、膨大な量のくず（ノイズ）を取り除かなければならない。さらにデータマイニングの特徴は、仮説を立てず、データに忠実にルール生成できることである。これは未知のルール発見という利点をもつが、多数の解釈困難なルールを生成してしまうという問題点も内在しており解析の特性をよく理解して解釈を行わなければ正しい結果は出力されない²⁴⁾。また、データマイニングの最終目的は意志決定、つまり問題解決であり単なる予測ではない。ここでデータから新知識獲得までの模範的なフローを図 2-1 に示す。この図は、「複数のプロセスが独立して存在しており、一連の流れにより新知識が獲得できるが、さらに質の良い新知識を獲得するには、繰り返して精錬していく」という意味を有し、「新知識発見のプロセス」を示している。すなわち、大部分の誤りは発掘の段階でないとわからないため、ひとつひとつのプロセスごとにフィードバックループを設けて繰り返していく必要性も示している。

2-2-1. カタログマイニングプロセス

提案するカタログマイニングプロセスを図 2-2 に示す。データベースとして工具カタログデータを用いる。前節で述べたように、データマイニングにおいてとくに重要なのはデータ

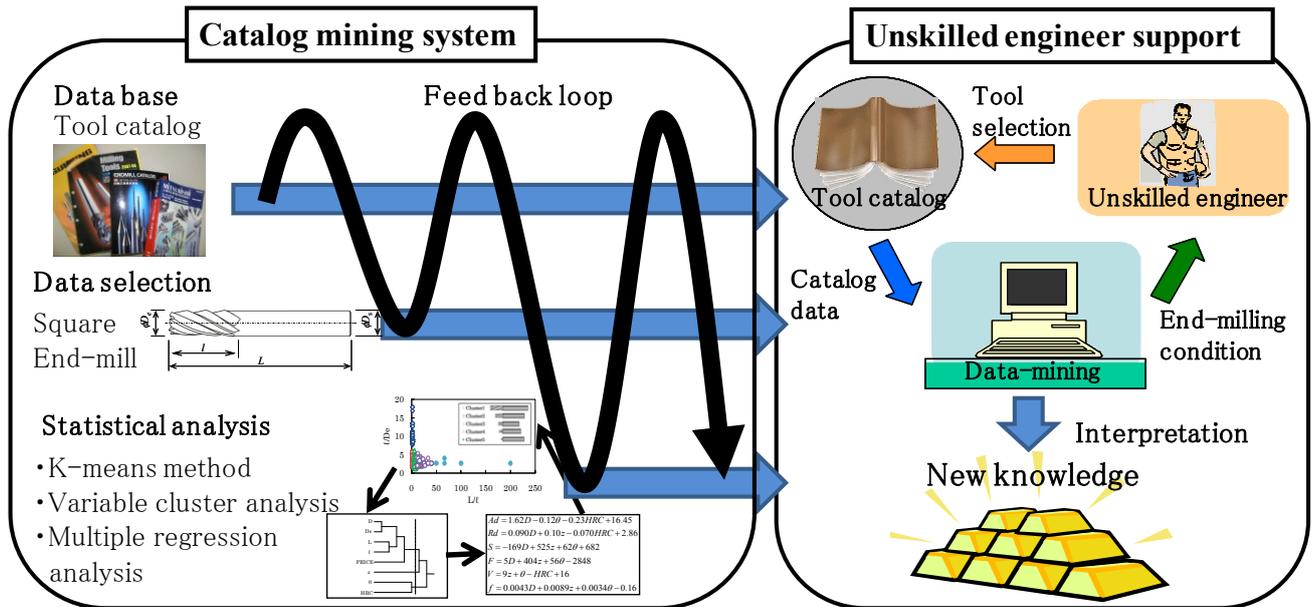


Fig. 2-2 Proposed catalog-mining process

の獲得、選択、データクレンジングである。データをデータマイニングに使える形に変換する部分が新知識発見のために必要な全プロセスに占める割合は70~80%であるといわれている²⁵⁾。しかし工具カタログデータでは、すでに工具メーカーで実験を繰り返した結果に基づく良質なデータが大量に存在していると考えられるため、解析者にとってデータの獲得、選択に時間を割く必要はない。またカタログには、すでに数値で表示されている工具データが多くデータクレンジングの多くを省略できるものと考えられる。そのため、カタログマイニングでは、クレンジングの次のプロセスであるデータのクラスタリングがとくに重要になると考えられる。そこで、データ構造解析手法（非階層型解析手法）であるk-means法によって工具形状によるビジュアル的なクラスタ分けを行った。次に統計解析手法として、階層型解析手法である変数クラスタ分析により、変数間の関係をビジュアル的に表現することでデータ構造の階層を把握する。そこで抽出された切削条件決定に有意な変数を用いた重回帰分析により切削条件式を導出し、工具形状（直径、全長、刃長、刃数）と切削条件について考察する。

すなわち提案するカタログマイニングシステムは、他の製造分野に適用されるマイニング手法に比べて、簡単で早く、しかも理解しやすいため、データマイニングに精通していない技術者でも取り扱いやすいのが特徴であるといえる。

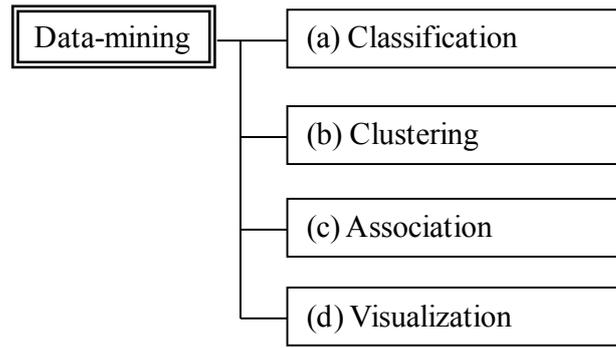


Fig. 2-3 Data-mining methodology

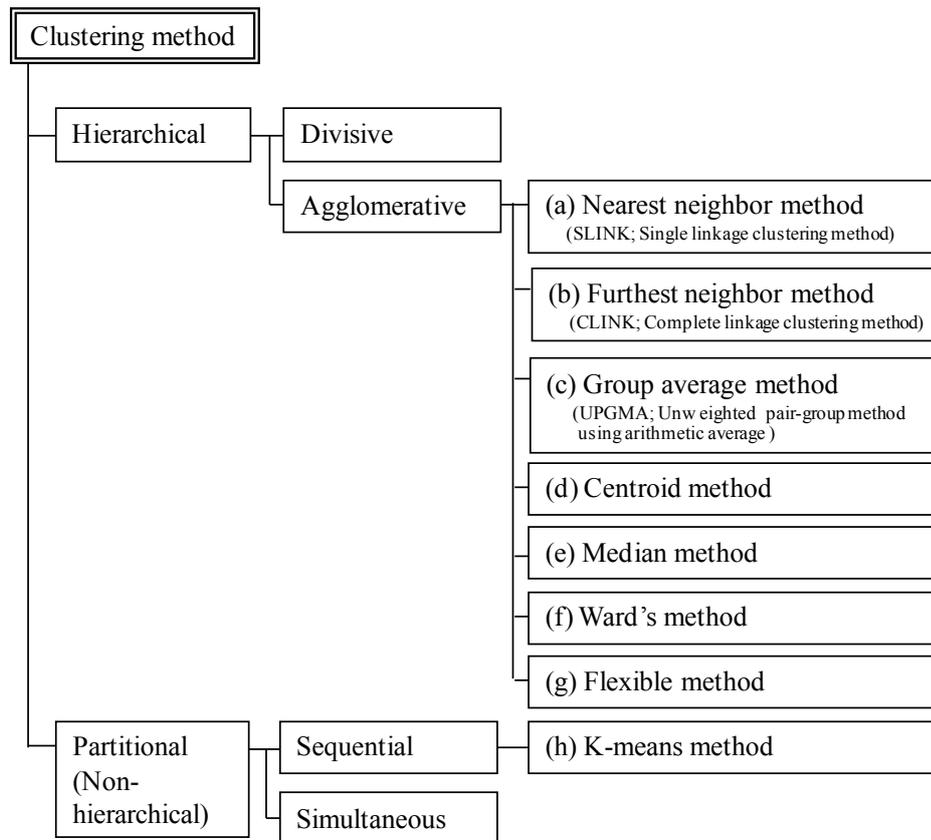


Fig. 2-4 Clustering methodology

2-2-2. 非階層・階層クラスタリング手法

データマイニングのツールとして知られているものを大別すると図2-3のようになる。その中で(b)クラスタリングはセグメンテーションとも呼ばれているが、属性間の距離などを基準にして、似通っている属性をもつデータをグループ化してクラスタを生成するものである。クラスタリングの手法は、数値分類法とも呼ばれ、図2-4に示すように、大きくは階層的な手法とK-means法に代表される分割最適化手法（非階層的な手法とも呼ばれる）に分けられる。階層的な手法はさらに分岐型と凝集型に分けられる。階層的な手法は、全ての対象を含む全体か

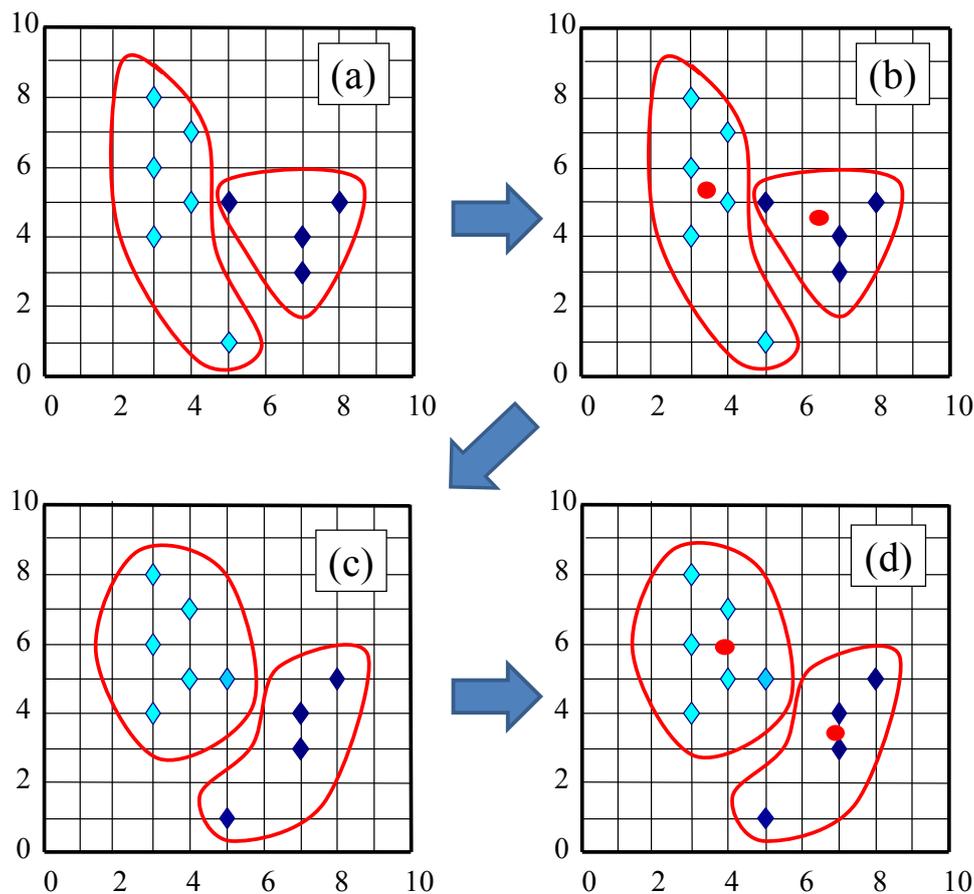


Fig. 2-5 K-means method operative examples

ら逐次分割していく非階層的手法とは逆に、1個の対象だけを含むN個のクラスタがある初期状態から、クラスタ間の距離関数に基づき、最も距離の近い2つのクラスタを逐次的に併合する。そして、この併合を全ての対象が1つのクラスタに併合されるまで繰り返すことで階層構造を獲得する手法である。

本論文で提案するカタログマイニングでは、非階層的手法としてK-means法を用いている。K-means法とはMacQueen, Anderberg, Forgyらにより提案された非階層型クラスタリング手法の代表例の1つである²⁶⁾。K-means法の計算アルゴリズムの模式図を図2-5に示す。K-means法は、あらかじめ固定された数（例えばK個）のクラスタ（図2-5中の(a)の赤線で囲まれたクラスタ）それぞれに代表である初期のプロトタイプ（中心点）を与え（図2-5中の(b)の赤点）、それぞれの個体を最も近いプロトタイプに割り当てることでクラスタリングを行う（図2-5中の(c)の赤線で囲まれたクラスタ）。個体が全て割り当てられたら、各クラスタごとの割り当てられた個体から新たなプロトタイプを算出する。このようにプロトタイプの算出と個体の割り当てが収束するまで繰り返す（図2-5中の(d)）ことで、適切なプロトタイプの推定

とデータの分割が行われる。通常、多変量の数値データの場合、クラスタのプロトタイプとして平均値（mean）を用いることから、 K 個のmeanということで、 K -means法と呼ばれる。データマイニングの手法の中では比較的単純なアルゴリズムで計算することができるため、データ構造を発見するさまざまな応用手法が提案されている。ここで、エンドミルの工具形状は加工性能に深く関連すると考えられる。とくに、熟練者は工具形状から加工性能を視覚的に判断して、工具が破損しないように効率的に用いようとする。それゆえ、まずは K -means法を用いて、工具形状に着目してカタログ全体のデータをいくつかのクラスタに分類する。 K -means法は一般には以下のような流れで実装できる。

- (1)各データ x_i に対してランダムにクラスタを割り振る。
- (2)割り振ったデータをもとに各クラスタの中心 V_j を計算する。計算は通常割り当てられたデータの各要素の平均（重心）が使用される。
- (3)各 x_i と各 V_j との距離を求め、 x_i を最も近い中心のクラスタに割り当て直す。距離 d は以下の式で求められるマンハッタン距離を用いる。

$$d(x, V) = \sum_{i,j=1}^n |x_i - V_j| \quad (2-1)$$

ここでマンハッタン距離を用いる理由は、距離を計算する際に平方をとらないため、外れ値に対して影響を受けにくいという利点に着目している。

- (4)上記の処理で全ての x_i のクラスタの割り当てが変化しなかった場合は処理を終了する。それ以外の場合は新しく割り振られたクラスタから V_j を再計算して上記の処理を繰り返す。

K -means法は欲張り探索で局所解を求める手法であるため、初期値によって最終結果は大きく影響される場合がある。そこで本研究では、初期状態をランダムに変更して複数回 K -means法を実行していくつかの分割を獲得し、それらの分割の中で残差平方和の尤度関数を最小にするものを選ぶ一般的に多用されている対処法を用いた。

工具カタログにはさまざまな数値的パラメータが存在するため、多変量データに対して統計解析手法の最も基本となる重回帰分析を用いた。ただし重回帰分析において、説明変数間で相関の高いものを用いる場合、予測信頼性が低下するため、あまり有効ではない。それゆえ、説明変数間の相関関係の構造を解析するため、重回帰分析の前に、変数クラスタ分析を導入する手法を提案する。階層型の変数クラスタ分析では、クラスタ間の融合の順序とその

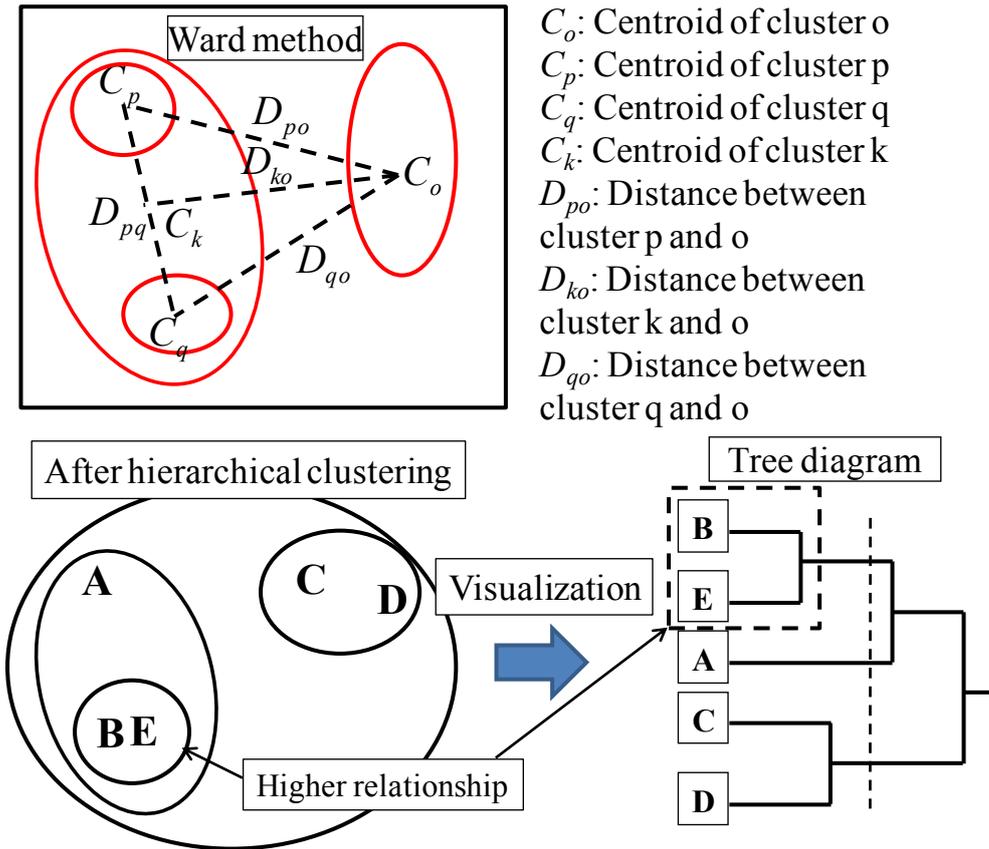


Fig. 2-6 Variable cluster analysis and ward method

類似度を表すデンドログラム（樹状図）が形成されるという特徴がある．図 2-6 に階層クラスタ間の距離計算にウォード法を用いた場合の変数クラスタ分析の実行例の模式図を示す．2つのクラスタ C_p と C_q が併合して，新たに C_k というクラスタを生成した場合と他のクラスタ C_o との距離は次式の通りとなる．

$$D_{ko}^2 = \frac{(m_p + m_o)D_{po}^2 + (m_q + m_o)D_{qo}^2 - m_o D_{pq}^2}{m_k + m_o} \quad (2-2)$$

ここで m はそれぞれのクラスタに含まれる個体数を示す．変数のクラスタ分析を行う場合には，2変数間の距離が式(2-2)で表されるため，個体のクラスタ分析と同じように取り扱うことができる．計算手法は，単相関係数 r_{xy} の計算を式(2-3)で行い，それをもとに次式に基づいて2変数 x と y の距離 d_{xy} を式(2-4)で定義する．

$$r_{xy} = \frac{\sum_{r=i}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{r=i}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{r=i}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (2-3)$$

$$d_{.xy}^2 = 2(1 - r_{.xy}) \quad (2-4)$$

2-2-3. 非階層・階層クラスタリング手法の併用効果

データマイニング手法は組み合わせる順序によっても結果が大きく左右してしまう場合があることが知られている²⁷⁾。そこでこのような各解析手法の利点と欠点を理解して適切に組み合わせる必要がある。重回帰分析は予測のための手法であり処理時間が早く、データの質に左右されないという利点があるが、相関の高い説明変数を組み込めないという欠点がある。説明変数間で相関の高いものが存在する場合、目的変数に対してどちらの影響度合いが強いか判然とせず、適切な偏回帰係数が算出できない。これは多重共線性と呼ばれる。一方変数クラスタ分析はデータの構造を判別するための手法であり、相関の高い変数を発見できるという利点があるが、導出される相関関係を反映した最適な分類が可能であるかどうかは、最終的な分析を行うまでわからないという欠点がある。上記の欠点ゆえに、変数クラスタ分析を行って説明変数を選択しても、多重共線性は起こりうる。しかし、これらを組み合わせることで各手法の欠点を他の手法の利点で補うことができる。工具カタログデータに対して、単に重回帰分析を行うだけでは埋もれていた知識を、階層型の変数クラスタ分析、および非階層型の K-means 法を適切な順の組み合わせで併用してビジュアル化することで、より容易に発掘できると考えられる。すなわち属性抽出によって、クラスタ分けおよび説明変数間の相関関係を明らかにすることで、重回帰分析の精度を上げることができ、係数符号の逆転現象をある程度防ぐことができる。

2-2-4. 製造分野におけるカタログマイニングの効果

複数の品種をさまざまな生産量で生産しても採算の合う生産システム、変種変量生産システムの期待が強くなってきた²⁸⁾。変種変量生産は、多様な要求に対応し、製品の種類や数に関わらず迅速かつ柔軟に生産することを目指すものである。そしてこれに対応するシステムの開発が急務である。このため、工具メーカー技術者の膨大な加工技術に関する知見が含まれている、カタログデータも統合した製造技術のいっそうの革新が求められている。図 2-7 に CAD・CAM システムとものづくりの概要を示す。近年、工業製品の多くが CAD で設計され、CAM で工具パスデータを作り、マシニングセンタによって切削加工が行われている。CAM システムは、組み合わせ最適化問題でモデル化される加工順序、使用工具、さらに運

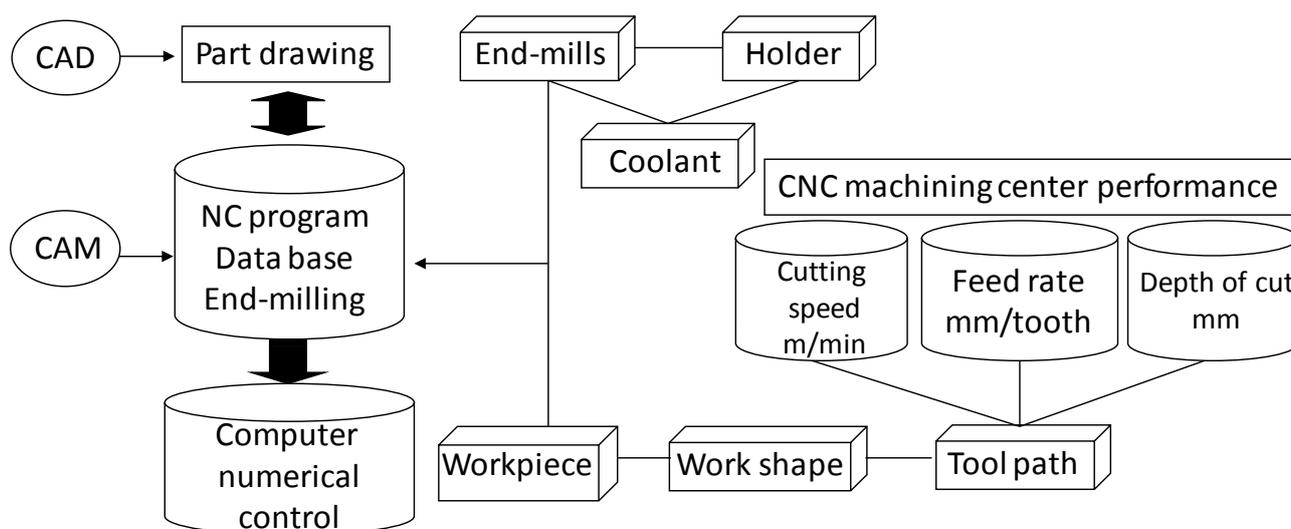


Fig. 2-7 Outline of CAD/CAM system

動学的な指令の組み合わせモデルの一例である切削条件を自動決定することはできないため、それらの決定は未だ背景知識や経験に頼る部分が多い。特に、工作物に近い位置にある工具の影響度は高くなるため、加工に適した使用工具を選択し、最適な切削条件を選定することが極めて重要であるといえる。ここで、非熟練者は、工具カタログに記載されている切削条件推奨条件表をもとに、条件設定を行うことが多い。しかしながら、カタログに記載されている工具形状や、対応する被削材と加工条件の問題も組み合わせ最適化モデルの一例として多岐に渡ることから、体系的かつ効率的に利用できていないのが現状と考えられる。カタログマイニングによって導出された切削条件決定式を用いることで、非熟練者はその場にある工具形状のクラスタリングだけで、従来の現場経験のプロセスに基づく場合に比べて、革新的に迅速に切削条件を算出することができる。またマイニング効果として、専門家も気付かない新知識が工具カタログから発見できれば、製造分野におけるデータマイニング技術の有効性がさらに開拓できると考えられる。

2-3. 解析結果と考察

前節では、データマイニング及び工具カタログデータの特徴を分析し、そのデータ構造の特徴に適したカタログマイニングの手法を検討した。そこで本節では、ケーススタディによりその有効性を具体的に考察する。

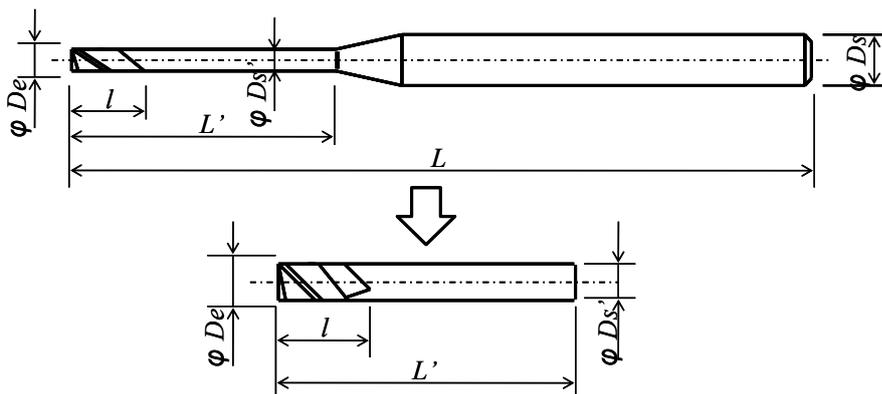


Fig. 2-8 Extracting effective length as representative shape

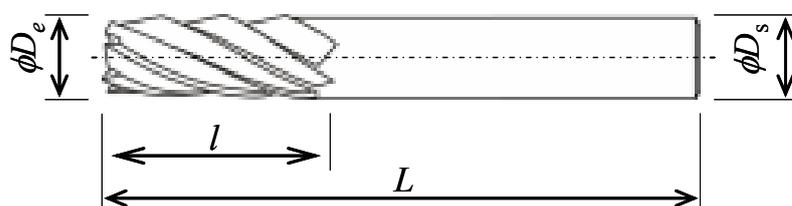


Fig. 2-9 Tool shape parameters

Table 2-1. Relationship between the number of flutes and equivalence diameter

Number of flutes z	Equivalence diameter D_e
2	$0.74 D$
3	$0.76 D$
4	$0.79 D$
6	$0.80 D$

2-3-1. 原データの取得

対象とする工具として、国内大手 A 社 2009-2010 年度版の工具カタログから超硬スクエアエンドミルを選択した。カタログに切削条件が記されているデータ（総数は 2235 項に及ぶ、

工具径で 0.1~50 mm) をデータベースとした。図 2-8 に示すようにロングネックタイプのスクエアエンドミルについては先端の有効長さ部分のみの工具形状を考慮し、首径がシャンク径、首下長さを全長とする。ロングネック形状のデータ数は 567 項で超硬エンドミル全体のデータの約 25%を占める。工具カタログには外径 D mm, 刃長 l mm, 全長 L mm, シャンク径 D_s mm, 刃数 z , ねじれ角 θ degree などの形状データと対象とする被削材の種類が記載

されている。また表示価格 $PRICE$ yen も記載されている。これら形状に関する変数全てを初期の対象説明変数とした。また、被削材の種類として $HRC32\sim60$ までの炭素鋼、合金鋼、焼入れ鋼を対象とし、その硬さ HRC を説明変数として加えた。目的変数は、溝加工において重要な条件因子である切削速度 V m/min, 一刃当りの送り (以後送り量と称す) f mm/tooth, 軸方向切込み量 Ad mm とし、側面加工では径方向切込み量 Rd mm も目的変数に加えた。

2-3-2. 工具形状による分類

非階層型クラスタリング手法である **K-means** 法を適用するために刃数や刃長を考慮したカタログマイニング用に工具形状のモデル化を考案した。そのモデルを図 2-9 に示す。刃数を考慮するため、刃部を同面積の円に置き換えた時の円の直径を相当径 De mm と定義した。多数のエンドミルを準備し、その質量と刃長の実測値より De を調べた。その結果、各刃数における刃部の相当径 De は表 2-1 の関係であることがわかった。

エンドミルの形状寸法の比を視覚化するため、 L/l , l/De , Ds/De , 刃部コーティングの 4 つの係数を導入した。刃部コーティングのように入力データがカテゴリの場合、データの数量化を行い計算される。文字列の数量化は、その列のクラス毎に列が作成されて各行の内容に対応するクラス列を 1 と設定し、それ以外の列を 0 と設定する。 L/l , l/De , Ds/De の 3 つの比をとることで、工具モデルにおけるスクエアエンドミルの概形が決定できる。なお **K-means** 法には(株)数理システムの **Visual Mining Studio** を用いた。

K-means 法によってクラスタ分けを行う過程において、分類するクラスタ数は解析者が自ら設定することになる。クラスタ数を多く設定するほど後のステップである重回帰分析による決定式の精度は良くなることもあるが、実際に使用する際に複雑になり見通しが悪化する。すなわち最適なクラスタ数を決定する必要がある。クラスタの数を 2, 3, 4, 5... と 1 つずつ増やしていき、最終的に切削条件式の決定係数が最高となる最小のクラスタ数を求めた。その結果、クラスタ数は 5 が最適であることがわかった。人間は 3 次元空間で生活をしているため、一般的に 3 つのパラメータなら人間にとって容易に認識できるといわれている²⁹⁾。それゆえ、大まかに 3 つのクラスタに分け、その間を各 1 つのクラスタで補完する形で 5 つにクラスタ分けすることは妥当と考える。

各クラスタのデータ数と L/l , l/De , Ds/De の 3 つの形状変数の平均値を表 2-2 に示す。クラスタ 1 は一般的形状、クラスタ 5 は先の細い形状であり、その間にクラスタ 2, そして 3, 4 が属する。実際に分類された各クラスタの L/l と l/De の関係を図 2-10 に示す。この図にお

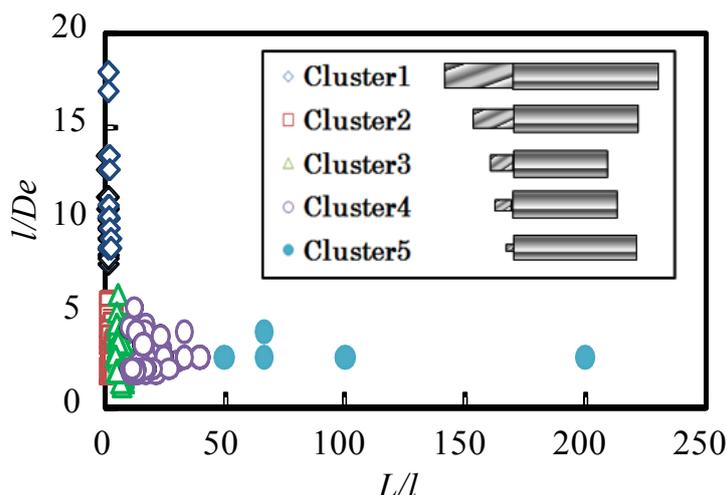
Fig. 2-10 Relationship between L/l and l/D_e

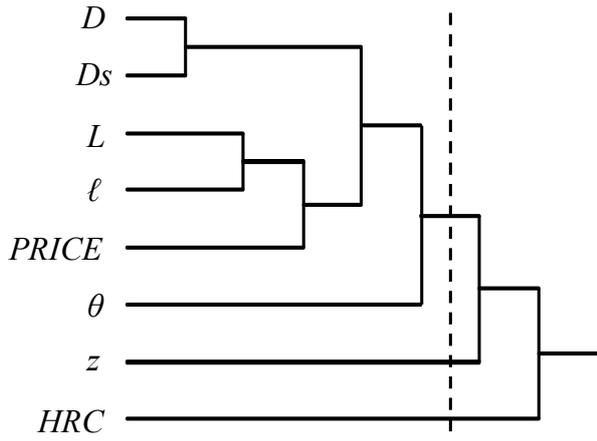
Table 2-2. Results of clustering by K-means method

Cluster	Data	l/D_e	L/l	D_s/D_e
1	152	11	2	1
2	1292	3	3	1
3	577	3	6	1
4	181	2	15	3
5	33	3	77	20

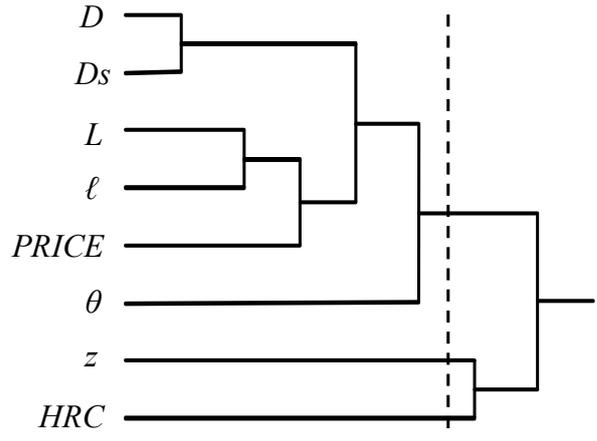
いて両変数が共に大きい形状の工具が存在しない（形状がある程度限定されている）ことがわかる。このことは工具として必要な剛性，あるいは用途上の問題に起因していると考えられる。以上より，スクエアエンドミルに関して考察したモデルを用いることで，ある工具がどのクラスに属するかを調べるときは，これらの2変数の値に着目するだけでよいことがわかった。工具カタログ上では，加工用途（主に側面加工と溝加工）で同じ工具形状でも推奨切削条件が区別して記載されていることが多い。そのため，分類された各クラスごとに，さらに側面加工，溝加工という加工用途の観点から2つのクラスに分類した。

2-3-3. 形状を代表する変数の選択

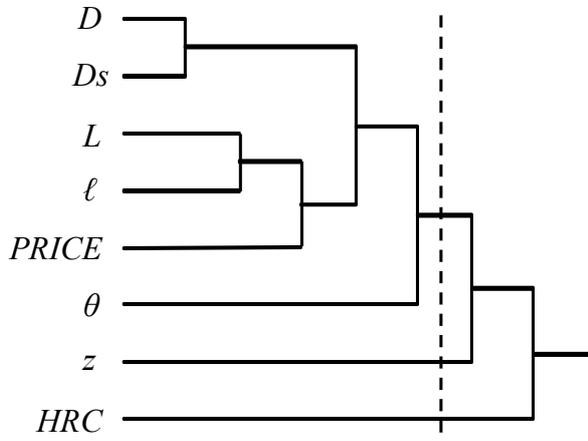
2-3-2節において K-means 法により工具形状および加工用途ごとに分類した各クラスのデータに対して，本節では変数クラス分析を行った。図 2-4 に示すように，変数クラス分析にはいくつかの距離計算手法が存在する。そこで本節では，数ある距離計算手法のなかで，最近隣法，最長距離法，群平均法，重心法，ワード法の5つの距離計算手法を用いて変数クラス分析を行った。例としてクラス3のデータに対して変数クラス分析を行っ



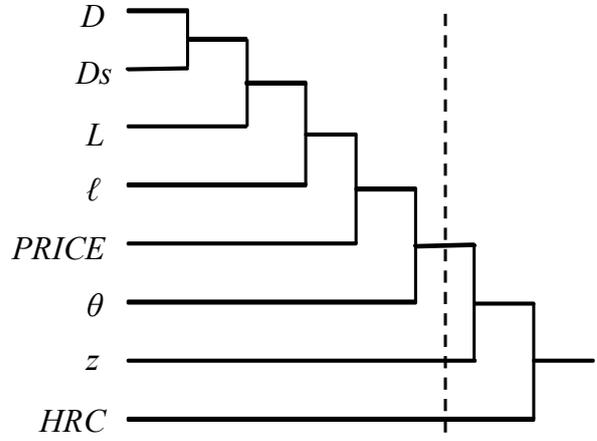
(a) Nearest neighbor method



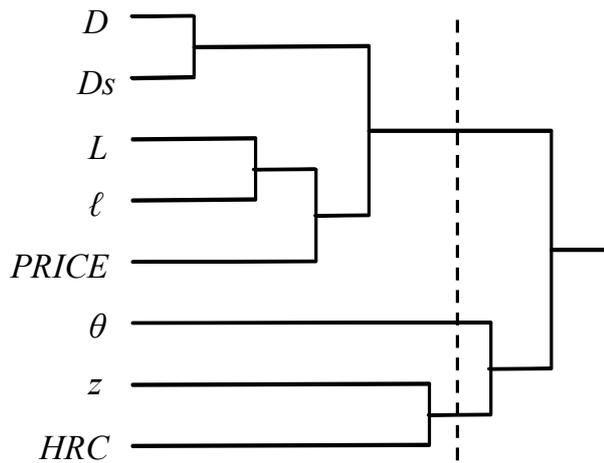
(b) Furthest neighbor method



(c) Group average method



(d) Centroid method



(e) Ward's method

Fig. 2-11 Results of variable cluster analysis (Cluster3, side-milling)

Table 2-3. End-milling condition decision equations (Ward's method)

Cluster	End-milling condition decision equations	
	Side-milling	Slotting
1	$V = -z - 0.4HRC + 40$ $f = 0.0027D - 0.0014z + 0.0082$ $Ad = 0.58L - 16.63$ $Rd = 0.00097L - 0.08$	No catalog data
2	$V = 8.76z + 1.49\theta - 1.15HRC + 16.07$ $f = 0.0089z + 0.0043D + 0.0034\theta - 0.16$ $Ad = 1.62D - 0.23HRC - 0.12\theta + 16.45$ $Rd = 0.090D - 0.070HRC + 0.10z - 1.85$	$V = -0.48\theta - 0.68D - 1.07HRC + 118.39$ $f = 0.0050z + 0.0013D + 0.033$ $Ad = 0.38D - 0.15HRC + 0.31z + 6.31$
3	$V = 23.13z + 2.87\theta - 1.78HRC - 51.82$ $f = 0.0057D + 0.013z + 0.0011\theta - 0.058$ $Ad = 1.23D - 0.094HRC + 5.33$ $Rd = 0.13D - 0.030HRC - 0.011\theta - 0.82$	$V = 2.31D - 0.94HRC - 0.0010PRICE + 88.04$ $f = 0.0023z + 0.0037D + 0.0039$ $Ad = 0.36D + 0.55z - 0.074HRC + 1.74$
4	$V = 1.29L + 16.36Ds - 0.96HRC - 57.52$ $f = 0.0054D + 0.00073L - 0.00018HRC - 0.030$ $Ad = 1.13D - 0.42Ds - 0.028HRC + 4.31$ $Rd = 0.13D - 0.0067HRC + 0.22$	$V = -0.91HRC - 0.0011PRICE + 7.05D + 71.95$ $f = 0.0052PRICE + 0.0068$ $Ad = 0.13D - 2.0 \times 10^{-5}PRICE + 0.42z + 71.95$
5	No catalog data	$V = 82.16D - 0.34HRC + 17.46$ $f = 0.0015D - 2.0 \times 10^{-5}HRC - 5.5 \times 10^{-5}PRICE + 0.0018$ $Ad = 0.086D - 8.9 \times 10^{-4}HRC + 0.039$

Table 2-4. Results of determination coefficient (Ward's method)

(a) Side-milling

Cluster	Side-milling			
	Cutting speed V	Feed rate f	Axial depth of cut Ad	Radial depth of cut Rd
1	0.12	0.99	0.87	0.87
2	0.24	0.33	0.67	0.38
3	0.41	0.58	0.90	0.68
4	0.40	0.87	0.88	0.67
5	No catalog data			
ALL	0.34	0.38	0.49	0.41

(b) Slotting

Cluster	Slotting		
	Cutting speed V	Feed rate f	Axial depth of cut Ad
1	No catalog data		
2	0.34	0.38	0.75
3	0.27	0.50	0.62
4	0.66	0.64	0.54
5	0.85	0.55	0.69
ALL	0.13	0.44	0.75

た結果得られた樹形図をそれぞれ図 2-11 に示す。これらの図をもとに相関の高い説明変数同士において、目的変数との相関係数を比較して相関の低い方を削減した。なお説明変数 x と目的変数 y の相関係数は式(2-3)で求めている。図 2-11(a)の最近隣法の樹形図を見ると、図中の点線で示される 3 つの階層クラスタのカッティング線 (図の左側の連結が各階層クラスタを示す) により、説明変数として刃数 z と被削材硬さ HRC が最初に選ばれる。次に工具径 D とシャンク径 D_s の相関が高い結果であるため、両者のうちでより目的変数に対して単相関の高い変数を選択する。同様に全長 L と刃長 l に対しては単相関の高いどちらかが選ばれる。たとえば、目的変数が軸方向切込み量 Ad のときでは工具径 D と刃長 l が採用される。そこで今度はそのうちのどちらかと表示価格 $PRICE$ でより目的変数に対して相関の高いどちらかを選択し、最終的に工具径 D と相関を比較して高い方を採用する。このように最終的に全ての説明変数間で相関係数 0.7 以下になるまで削減を行い、3 つの説明変数を各条件式に対して選択した。なお変数クラスタ分析と重回帰分析は(株)エスミの Excel 多変量解析 ver.5.0 を用いた。

2-3-4. 導出された切削条件式の妥当性の検討

非階層的な手法である K-means 法によって工具カタログデータからクラスタ分けし、各クラスタについて階層的な手法である変数クラスタ分析を用いて多重共線性のない 3 つの有意な説明変数を選択し、最後にそれぞれの目的変数に対して選択された説明変数を用いた重回帰分析により、切削条件の決定式を導出する。予側システムとしての精度を上げるためには応答曲面法などの非線形な手法³⁰⁾を用いる必要があるが、本節ではまず、非熟練者でも単純に見通しができる線形の重回帰分析で検討する。2-2-2 節によるワード法によって得られた説明変数を用いた切削条件式を、各クラスタについて加工法と目的変数別にまとめて表 2-3 に示す。上述の各距離計算手法について、切削条件決定式の精度を表す決定係数を求めた。例としてワード法によって得られた結果について表 2-4 に示す。ここで表中の ALL は K-means 法によってクラスタリングを行わないで、そのままの全データで重回帰分析を行った際の決定係数である。一般的に決定係数が 0.5 以上ならば重回帰分析の精度は良いとみなされる。どの距離計算手法においても ALL に比べて、非階層・階層型クラスタリング手法を用いた方が、決定係数が 0.5 以上の条件を満たすことが多いことから、併用の効果が表れ、重回帰式としては十分な精度となった。しかし一部側面加工に関して切削速度 V の決定係数が 0.5 以下のものが残るため、まだ検討の余地が残ることもわかった。この結果は、切

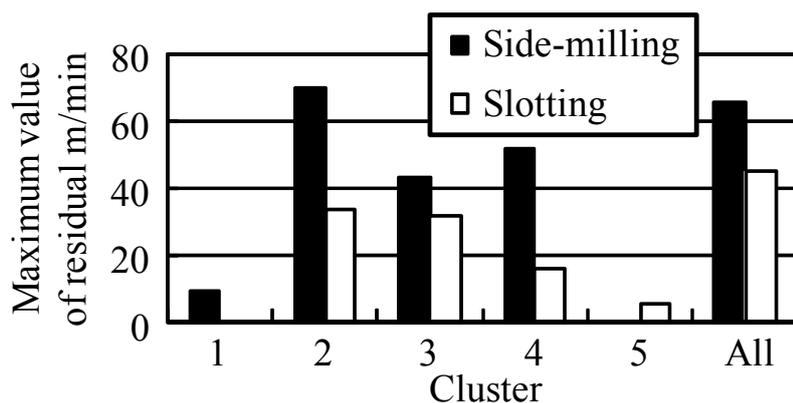


Fig. 2-12 Maximum value of residual (Cutting speed)

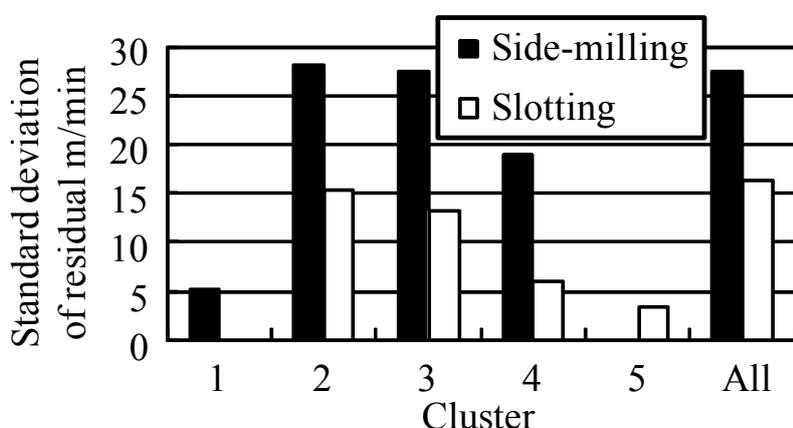


Fig. 2-13 Standard deviation of residual (Cutting speed)

削速度は切削時の温度、動的荷重、びびり振動などと密接に関係するなど外乱要因が多く、送り速度、切込み量に比べて適切な値の導出が難しいことを示唆している。すなわち切削条件の設定の中で、とくに切削速度の選定は最も注意を要することがマイニング結果の解釈により判明した。軸方向切込み量 Ad については ALL による条件式の精度が良いことがわかった。

また決定係数から、距離計算手法の違いによる決定係数の差は少ないことがわかった。一般的に複数ある距離計算手法の中でもウォード法が最も階層クラスタリングの精度が良いとされているが、工具カタログのデータベースではその違いは判明しなかった。

ここで、導出された切削条件式について、カタログ値と予測値の誤差を定量的に示すため、例としてウォード法によって選択された説明変数で導出された条件式の残差の最大値と残差の標準偏差を各目的変数について求めた。目的変数が切削速度 V の場合について、残差の最大値と標準偏差をそれぞれ図 2-12、図 2-13 に示す。図 2-12、図 2-13 より、決定係数が 0.5

以上となった目的変数では、切削条件式の残差の最大値も残差の標準偏差も、非階層・階層クラスタリング手法を用いなかった結果より小さいことがわかる。すなわち、非階層・階層クラスタリング手法を併用した効果によって残差は低くなっていることから、本モデルの手法を用いることで、非熟練技能者が初期の目安とするべき程度の条件は十分に示すことができることがわかった。一方で、切削速度 V の条件式において決定係数が 0.5 未満であるクラスにおいて、残差の最大値および標準偏差は ALL に比べて大きいため、併用の効果が表れていない。すなわち、精度の良い切削速度 V の条件式を線形式で表すことは困難であることを示唆しており、非線形な手法による導出の必要性がある点については今後の課題である。しかしながら、このような新知識の発掘が行えたのはデータマイニングの効果を示す意味で有効であったと考えられる。

2-4. 結言

工具カタログデータに対して、非階層・階層クラスタリング手法を組み合わせたデータマイニング手法を適用し、切削条件を導出できるシステムについて考察した。特にスクエアエンドミルの形状に対して、刃部に軸方向の断面が等しい相当径 D_e を導入して、非階層クラスタリングを遂行する手法を提案した。その結果、非熟練技能者を支援できるシステムとして、工具カタログデータに非階層・階層クラスタリング手法を適用することは、迅速な切削条件の導出に有効であることがわかった。ただし、切削速度 V は容易な線形回帰式だけで判断することはできないこともわかった。

第3章 自明な工具パラメータを除いたマイニング手法の提案

前章では、工具カタログデータに、階層・非階層型のクラスタリング手法を適用することで、切削条件決定を支援できるシステムを用いた知識発見手法の提案を行った。提案する手法では、工具カタログに記載されている膨大な工具メーカーの公開情報に基づき、データマイニングプロセスにおいて生産加工技術に価値ある新知識の発掘が可能であることが示せた。そこで本章³¹⁾³²⁾では、切削条件決定に際して、データクレンジングの新しい試みとして背景知識より自明であると考えられる変数（工具外径 D ）を一定値に固定化することで、他の工具パラメータの切削条件への影響度合いを考察した。

3-1. 緒言

前章では膨大なデータを有するスクエアエンドミル工具カタログに記載されている工具パラメータ（工具外径 D mm, 刃長 l mm, 全長 L mm, シャンク径 D_s mm, 刃数 z , ねじれ角 θ degree, 被削材硬さ HRC , 表示価格 $PRICE$ yen）に対して、データマイニング手法を適用した切削条件決定支援システムを提案し²⁰⁾³³⁾、非階層・階層型クラスタリング手法の併用効果を明らかにした¹⁹⁾。データマイニング手法によって抽出された切削条件決定に重要な因子を説明変数、工具カタログに記載されている切削条件を目的変数として、線形の重回帰分析により切削条件決定式を導出した。

そこで、重回帰分析の結果より得られた前章の標準化偏回帰係数についてみると、工具の外径 D mmがすべての切削条件予測において有意であることがわかる。外径 D とエンドミル突き出し長さ L' は $L'/D=3\sim 5$ が一般的である。エンドミルの剛性は突き出し長さ L' の3乗に反比例する³⁴⁾。系の剛性の低下はびびり振動、すなわち切削時の安定性を左右し、それらに関連する研究論文はこれまで数多く報告されている³⁵⁾。しかしながら、これらも本質的には L'/D が重要な変数である。また工具カタログでは切込み量などの因子は外径 D の定数倍によって定義されている。したがって、データマイニング等の手法を用いて検証しなくても、外径 D は切削条件決定に有意で自明な変数であるとも考えられる。

そこで本章では、データクレンジングの一種の試みとして、この一般的に有意な因子を説明変数から除外することによって、自明な変数の裏に隠れた他の影響因子が切削条件決定にどの程度有意であるのか定量的に考察を行った。

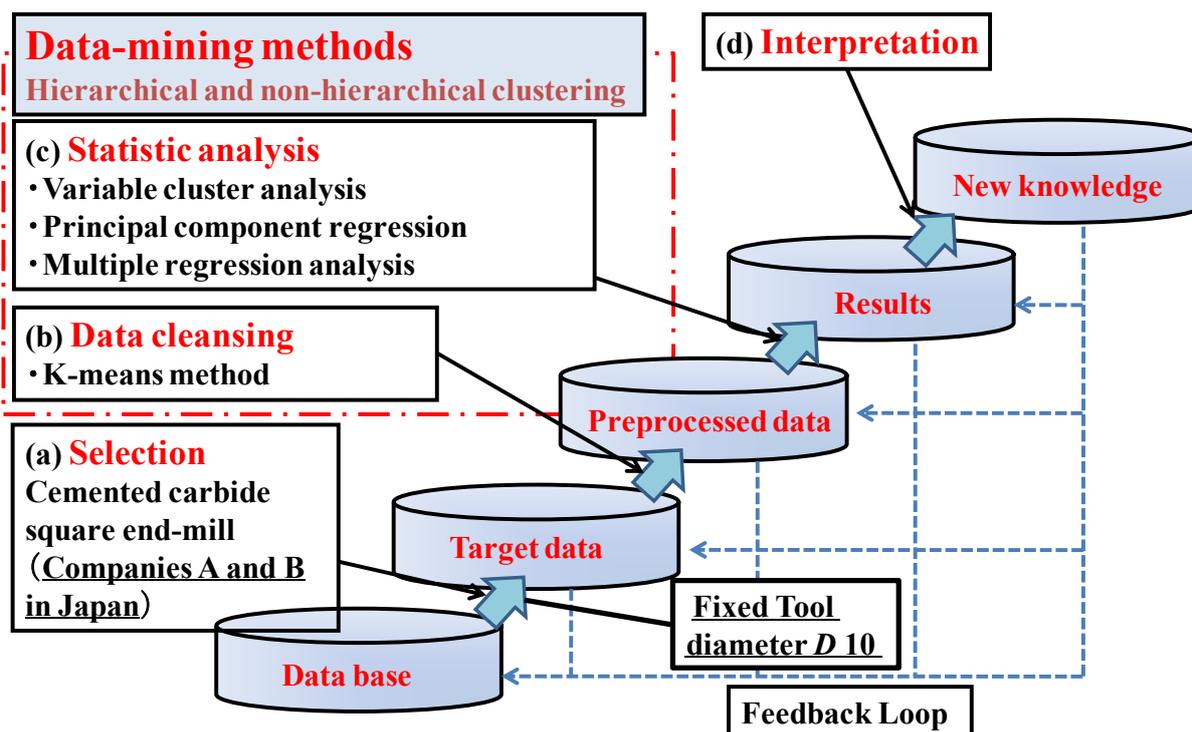


Fig. 3-1 Catalog mining process

3-2. 本章におけるカタログマイニングプロセス

本章におけるカタログマイニングプロセスを図 3-1 に示す。前章では、データベースとして、日本国内 A 社超硬スクエアエンドミルのみを選択したが、本章では日本国内 A 社データ、B 社データおよび A 社、B 社データを混合したデータ群それぞれについて、提案手法を適用した。工具カタログに記載されている工具パラメータを説明変数とするが、ターゲットデータとしては工具径（一定）のみとし、重要な加工条件因子であるカタログ基準切削条件を目的変数として予測式を構築する。まず、非階層型クラスタリング手法である K-means 法によって工具形状によるビジュアル的なクラスタ分けを行った。次に統計解析手法として、階層型解析手法である変数クラスタ分析により、変数間の関係をビジュアル的に表現することでデータ構造の階層を樹形図によりビジュアル化し、さらに本章では、新たに主成分回帰により説明変数間の相関関係を定量的に示す手法を追加した。主成分回帰のアルゴリズムを以下に示す。まず、説明変数に主成分分析を適用し、各々の説明変数を相互に相関のない（直交した）いくつかの固有ベクトルで表す。次に求められた固有ベクトルと各説明変数のデータから、説明変数ごとに主成分得点を算出する。最後に、目的変数と主成分得点の重回帰分析を行う。主成分得点は互いに無相関なので、ここで行う重回帰分析は多重共線性を示さない。重回帰分析の偏回帰係数と固有ベクトルとの積和により、回帰係数 C_p を求める。 C_p は

式(3-1)で表される.

$$\vec{C}_p = A \cdot \vec{b}_m \quad (3-1)$$

$$\left(\vec{C}_p = [C_1, C_2, \dots, C_p]^T \right) \quad A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1m} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{p1} & a_{p2} & \dots & a_{pm} \end{bmatrix} \quad \vec{b}_m = [b_1, b_2, \dots, b_m]$$

ここで、 a_{pm} は固有ベクトル、 b_m は偏回帰係数である。重回帰分析により切削条件決定行列式を導出し、工具形状パラメータと切削条件について考察した。

3-3. エンドミル外径 D を固定した場合のカタログマイニング

3-3-1. 工具カタログデータと固定するエンドミル外径

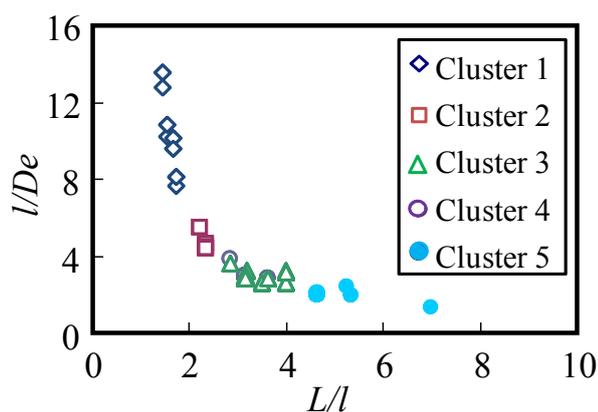
図3-1に示すように、エンドミル外径 D を一定値に固定したデータベースを用いて、非階層型・階層型クラスタリング手法¹⁹⁾を適用し、知識抽出を行う。対象とする工具として、国内大手A社およびB社の2010-2011年度版工具カタログから超硬スクエアエンドミルおよびラジアスエンドミルを選択した。またA社およびB社のカタログデータを混合したデータベースについても、検討した。コレットホルダの型番でBT30およびBT40を使用できる工作機械を想定し、固定するエンドミル外径値 D を $\phi 10$ とする。A社およびB社の外径が $\phi 10$ であるエンドミルの説明変数範囲を表3-1に示す。被削材の種類としては炭素鋼、合金鋼、焼き入れ鋼を対象としている。

3-3-2. 工具形状による属性抽出

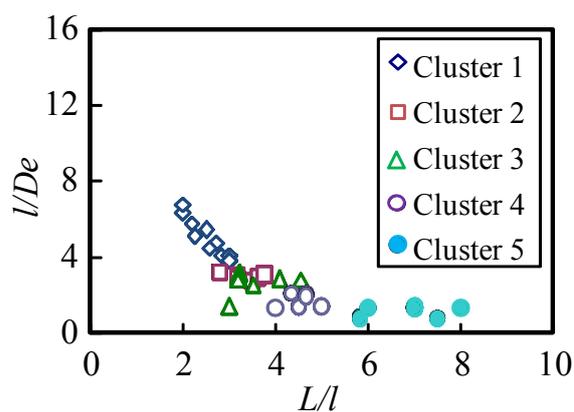
上述のターゲットデータに対して、K-means法により、工具形状によるクラスタリングを行った結果を図3-2に示す。このとき前章と同様に、クラスタの数は5つとした。エンドミルの形状寸法の比を視覚化するため、 L/l 、 l/De 、 Ds/De 、刃部コーティングの4つの係数を導入した。さらに前章と同様に、刃数を考慮して、刃部を同面積の円に置き換えた時の円の直径を相当径 De mm と定義した。図3-2(a)と(b)を比較すると、変数の範囲には少し差が存在することがわかる。しかしながら図3-2(c)より、それらをかさね書きすると、ほぼ一本の曲線上に分布していることがわかる。したがって、A社とB社の工具形状分布は、ほぼ一致していることがわかる。このことから、公開されている大手工具メーカー各社のカタログデータにおいて、 $\phi 10$ のスクエアエンドミルの工具形状に大きな差異はないことがわかる。

Table 3-1. Ranges of predictor variables

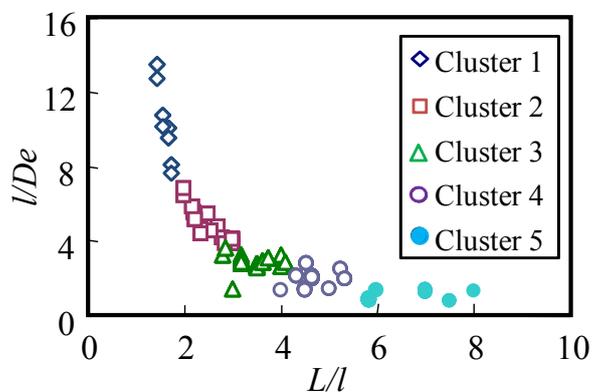
	Maker A	Maker B
Data size	239	282
Over all length L mm	70-145	30-100
Length of cut l mm	10-100	6-50
Number of tooth z	2,3,4,6	2,3,4,6
Helix angle θ degree	30,35,38,45,50	20,30,45,50
Workpiece hardness HRC	30-60	20-72
Catalog price $PRICE$ yen	5990-37700	4000-27300



(a) Maker A



(b) Maker B



(c) Maker A and B combined

Fig. 3-2 Relationship between L/l and l/De

3-3-3. 変数クラスタ分析と主成分回帰による知識抽出

図3-2において、各社で一番データ数が多いクラスタに着目して統計解析手法を適用する。当該クラスタはA社においてクラスタ4、B社においてクラスタ3、A社、B社混合データに対してクラスタ3である。それぞれのクラスタに対して、階層型クラスタリング手法である変数クラスタ分析と主成分回帰を行った結果を図3-3、図3-4に示す。変数クラスタ分析におい

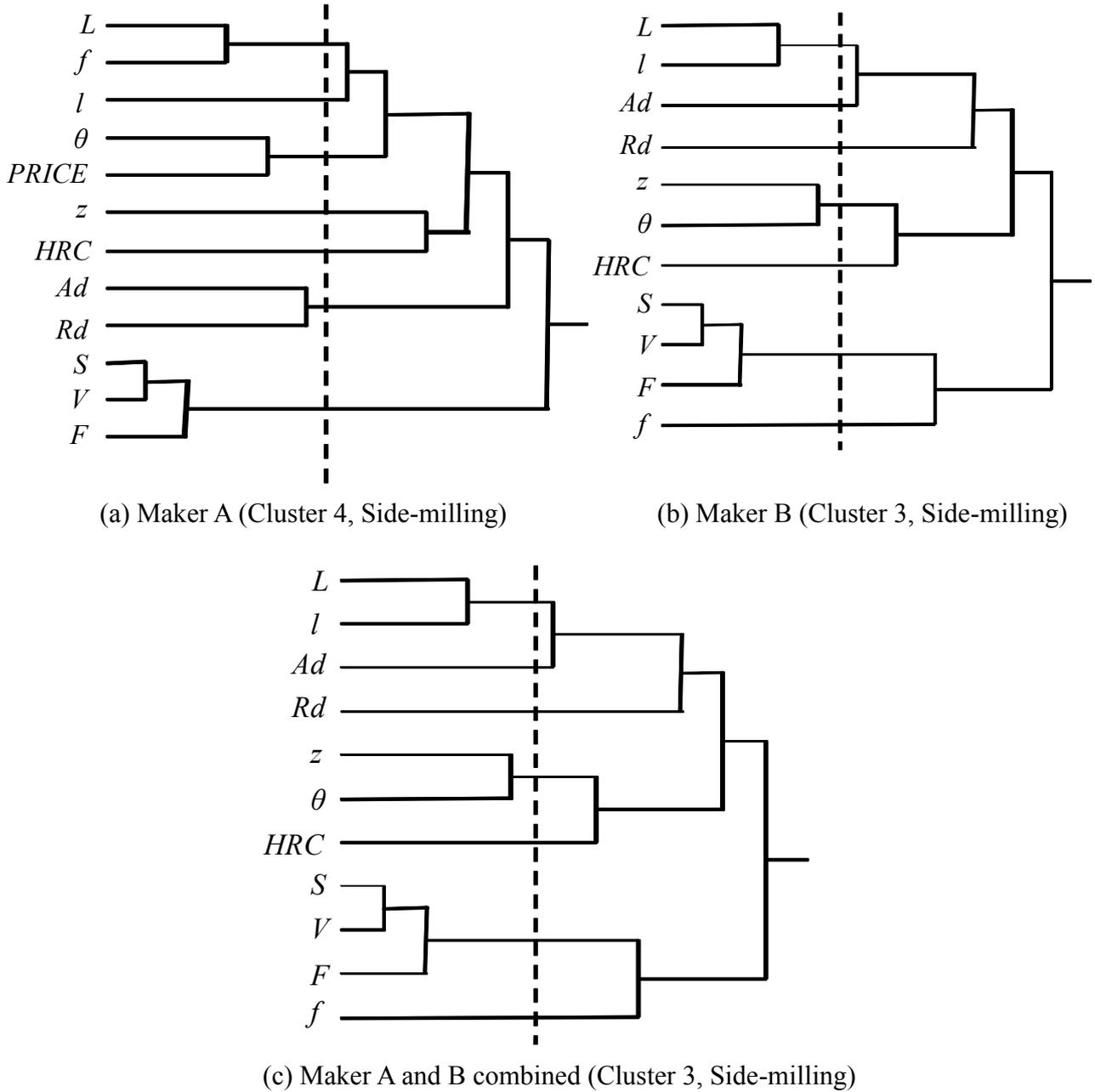


Fig. 3-3 Results of variable cluster analysis

て、変数間の距離はワード法によって計算した。図3-3のような樹形図においてカッティング線（破線）で区切った左側の階層クラスタに注目することで、データ間の相関関係を知ることができる。本章以降、K-means法によって同導出されたクラスタと区別するため、変数クラスタ分析によって得られたクラスタを階層クラスタと称する。たとえばA社の場合、全長 L と送り量 f 、ねじれ角 θ と表示価格 $PRICE$ 、軸方向切込み量 Ad と径方向切込み量 Rd 、主軸回転数 S と切削速度 V 、テーブル送り速度 F の4つの階層クラスタとそれ以外の変数単体の階層クラスタで合計7つの階層クラスタに分けられる。また、変数同士のつながりの段階

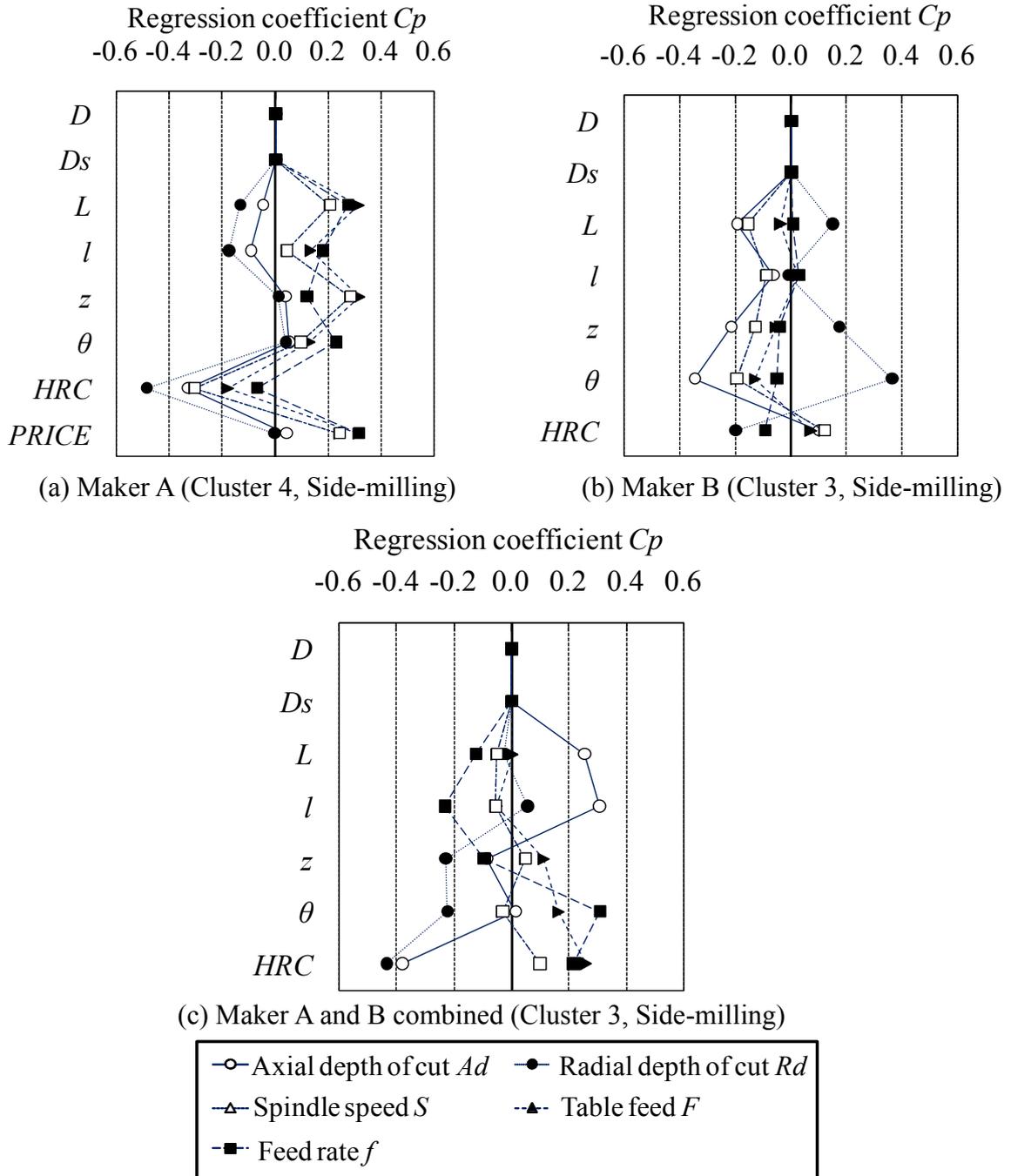


Fig. 3-4 Results of principal component regression

が早い階層クラスタほど、変数間の相関関係は大きい。A社において、表示価格 $PRICE$ とねじれ角 θ に相関関係がみられる。工具出荷量などにも影響を受けるために単純ではないと思われるが、ねじれ角が大きいほど刃先形状作成のための研磨時間や加工技術が必要なため、工具価格は高くなる傾向にあるのではないかと考えられる。表3-1より、A社ではB社に比べてねじれ角の種類が多いことから、表示価格との相関関係があらわれたものと考えられる。また全長 L と送り量 f に相関がみられる。A社には刃長の長い立壁切削専用の工具が含まれ

ている。このような工具は、全長に対する刃長の比率が大きいほど、切削時の安定性を考慮して径方向切込み量 Rd を低くし、送り量 f が高く設定されている。そのため、全長 L と送り量にはB社にない相関がみられていると考えられる。A社B社混合の場合、A社においてみられる刃数 z と被削材硬さ HRC の相関関係、軸方向切込み量 Ad と径方向切込み量 Rd の相関関係およびB社においてみられる全長 L と刃長 l の相関関係、切削速度 V と送り速度 F の相関関係がみられる。

図3-4について、横軸の回帰係数は説明変数の目的変数への影響度合いを表し、正の値の場合は正の相関、負の値の場合は負の相関を表している。回帰係数の絶対値が大きいほど、相関関係は強い。外径 D は固定化されているため、図3-4において外径 D と目的変数への相関は計算できないので0とした。シャンク径 D_s について、 $\phi 10$ のエンドミルでは一般的にシャンク径 D_s も $\phi 10$ であり段付きの形状でないため、外径と同様に説明変数から除外される。A社について、全長 L と送り量 f には0.3の正の相関があることから、図3-3の考察と一致する。またすべての目的変数は被削材硬さ HRC と-0.5~0.1の負の相関関係を示す。ねじれ角 θ と刃数 z はすべての目的変数に対して0.1~0.5の正の相関の相関関係を示す。一方、B社について径方向切込み量 Rd を除いて、ねじれ角 θ と刃数 z には-0.4~-0.1負の相関関係がみられる。A社B社混合の場合、A社、B社で特徴的にみられた相関関係がそれぞれみられた。A社B社混合で得られた回帰係数がA社、B社の両方の回帰係数と異なる場合が切込み量の相関関係に対してみられる。主成分回帰において、各社の説明変数の重心を計算して、重心を基準とした分散を固有ベクトルとして計算している。A社とB社を混合することによって重心の位置がずれることで、データの分散が異なり、固有ベクトルの値が変化することによって回帰係数の符号が逆転したと考えられる。

このように、自明な変数である外径 D を固定化することで、前章では棄却されていた変数間の関係が明確になり、その裏側に隠された知識を抽出することが可能となった。

3-3-4. 切削条件決定行列式の導出

図3-3、図3-4より、目的変数への影響度合いの大きい説明変数を選択した。図3-3より、重回帰分析の際に、多重共線性を防ぐために、説明変数間の相関関係が大きなものは重回帰分析に用いないのが一般的である。図3-4よりすべての説明変数が目的変数に対して影響度合いをもつことはないため、多重共線性を無視して説明変数すべてを選択して重回帰分析を行ったとしても、決定係数の向上はみられない。また人間の空間把握能力の限界は3次元であ

るため、各切削条件決定式の中で、説明変数は最大で3つまでとした¹⁹⁾。各社について、導出された切削条件決定行列式を式(3-2), (3-3), (3-4)に示す。左辺は目的変数ベクトルであり、右辺は切削条件決定に影響する行列と説明変数ベクトルの積と定数項で構成される。多変量解析の場合、式中の*R*は決定係数を表し、一般的に0.5以上ならば予測式としての精度は十分であるといわれている。

(1)A社の切削条件行列式 (クラスタ4)

$$\begin{bmatrix} Ad(R0.2) \\ Rd(R0.3) \\ S(R0.3) \\ F(R0.4) \\ V(R0.4) \\ f(R0.4) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.16 & 0.014 & -0.13 \\ -0.046 & -0.37 \times 10^{-2} & -0.049 \\ -103 & 100 & 648 \\ -42 & 93 & 438 \\ -3 & 3 & 20 \\ -0.79 \times 10^{-3} & 0.32 \times 10^{-2} & -0.51 \times 10^{-2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} HRC \\ L \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 20 \\ 3.39 \\ -1735 \\ -5513 \\ -54 \\ -0.11 \end{bmatrix} \quad (3-2)$$

(2)B社の切削条件決定行列式 (クラスタ3)

$$\begin{bmatrix} Ad(R0.5) \\ Rd(R0.5) \\ S(R0.2) \\ F(R0.4) \\ V(R0.3) \\ f(R0.5) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.15 & 0.13 & 0 & 0 \\ -0.042 & 0 & 0 & -0.058 \\ 0 & -113 & 961 & 23 \\ 11 & -83 & 914 & 0 \\ 0 & -4 & 30 & 0 \\ 0.14 \times 10^{-2} & -0.29 \times 10^{-2} & 0.52 \times 10^{-2} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} HRC \\ L \\ z \\ \theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 8 \\ 5.37 \\ 7796 \\ 3512 \\ 245 \\ 0.21 \end{bmatrix} \quad (3-3)$$

(3)A社, B社混合の切削条件決定行列式 (クラスタ3)

$$\begin{bmatrix} Ad(R0.4) \\ Rd(R0.3) \\ S(R0.1) \\ F(R0.1) \\ V(R0.2) \\ f(R0.2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.15 & 0.024 & 0.51 & 0 & 0 \\ -0.044 & 0 & 0 & -0.022 & -0.016 \\ 0 & 35 & -347 & 685 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 546 & 29 \\ 0 & 1 & -11 & 22 & 0 \\ 0.40 \times 10^{-3} & 0 & -0.87 \times 10^{-2} & 0 & 0.19 \times 10^{-2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} HRC \\ L \\ l \\ z \\ \theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 7 \\ 3.71 \\ 6145 \\ -1960 \\ 193 \\ 0.17 \end{bmatrix} \quad (3-4)$$

ほとんどの切削条件式において、式(3-3)の *Ad*, *Rd* を除くと、精度をあらわす決定係数は0.5未満であった。データベースを混合した場合、それぞれの切削条件決定行列式で採用された説明変数が採用されている。その場合、とくに速度の次元をもつ *S*, *F*, *V*, *f* で極めて低い決定係数を示している。幾何学的な変数 *Ad*, *Rd* に比べ、これらの変数は切削時の工具の温度上昇などに大きな影響を与えると考えられ、前章と同様の傾向を示しており、速度の次元に関する変数の設定において、より慎重な判断が必要であることがわかった。

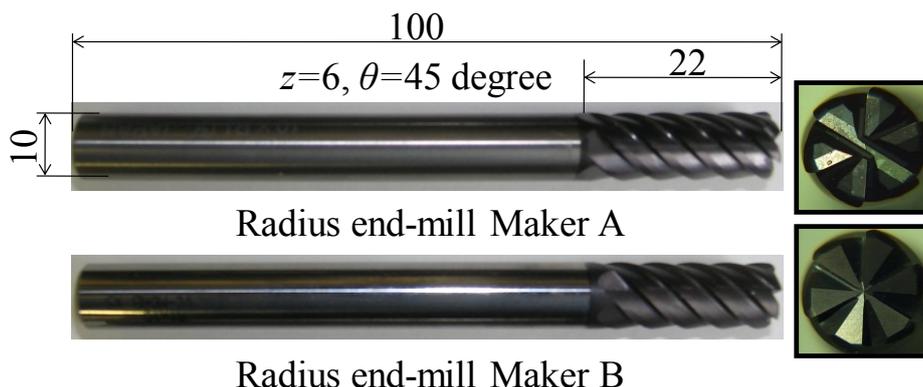


Fig. 3-5 Radius end-mill shape parameters

Table 3-2. End-milling conditions of each maker

	Mined conditions			Catalog conditions	
	Maker A	Maker B	Makers A and B combined	Maker A	Maker B
Spindle speed S rpm	6694	3297	6121	7950	12000
Table feed F mm/min	5502	1279	3122	4800	7100
Cutting speed V m/min	210	104	192	250	377
Feed rate f mm/tooth	0.14	0.07	0.09	0.10	0.10
Axial depth cut Ad mm	12	14	12	10	10
Radius depth of cut Rd mm	0.30	0.50	0.50	0.30	0.50
MRR cc/min	20	9	20	14	36

3-4. 導出された切削条件決定行列式の考察

3-4-1. 対象とする工具形状

金型鋼である焼き入れされたダイス鋼 SKD61 (HRC53) を被削材とした荒加工を想定し、ダイス鋼のカタログ基準条件が設定されている $\phi 10$ のラジラスエンドミルについて、切削条件決定行列式から切削条件を導出し考察する。対象工具として、A 社、B 社で説明変数に使用した工具パラメータが一致する 2 種類の高速切削用ラジラスエンドミルを選択した。工具形状を図 3-5 に示す。図 3-5 に示した外観の工具形状だけでは、どの工具がどのメーカーに属するのか、適切な切削条件をどのように設定すればよいのかを非熟練技術者にとっては判断が難しいものと考えられる。実際には、切削性能を支配するすくい角や逃げ角、工具母材の材質、刃部コーティング材質、カタログ基準条件を導出した工作機械剛性やその主軸回転数の上限値の差異など、カタログでは記載されていない重要な情報により、一見形状がほとんど一致していても 2 つの工具のカタログ基準条件は異なっている。そこで、A 社、B 社、A 社と B 社混合のデータベースより導出された切削条件決定行列式から切削条件を導出する

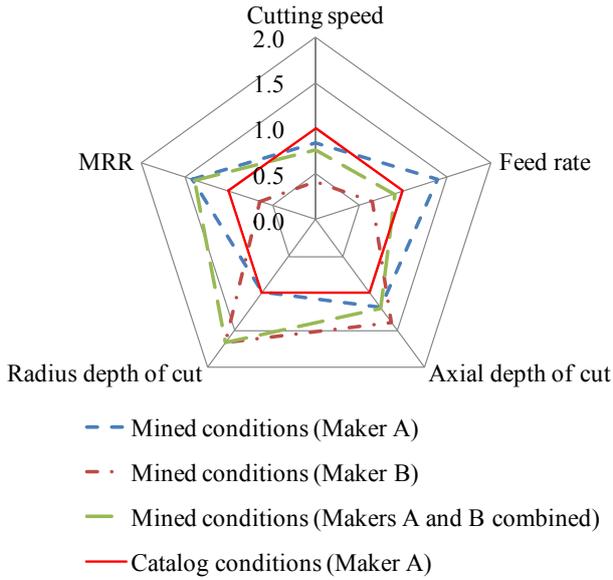


Fig. 3-6 Radar chart based on maker A recommended condition

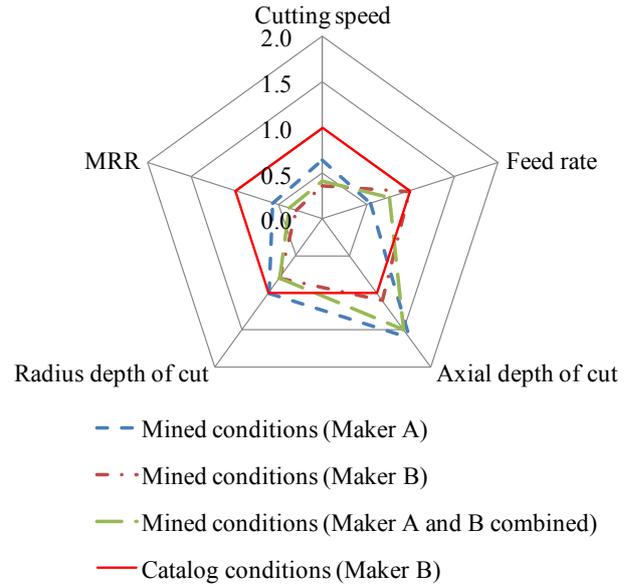


Fig. 3-7 Radar chart based on maker B recommended condition

ことで、マイニング推奨条件を導出し、メーカーが推奨するカタログ基準条件と比較検討した。2種類の工具は上記で行列式を導出したクラスタに属している。

3-4-2. 導出された切削条件の考察

図3-5に記載されている工具パラメータを式(3-2), (3-3), (3-4)に代入することで切削条件を導出した。切削速度 V と主軸回転数 S の切削条件決定式について、より決定係数の大きい方を選択して切削条件を導出した。送り量 f とテーブル送り速度 F についても同様の基準で選択した。導出された切削条件を表3-2に示す。さらに本章では新たな変数として、材料除去率の目安となる MRR cc/minを各切削条件から算出した。以下の式(3-5)に MRR の導出式を示す。

$$MRR = \frac{f \cdot z \cdot Ad \cdot Rd \cdot V}{\pi \cdot D} \quad (3-5)$$

各社について切削条件決定式によって得られた値を A_a, A_b, A_{ab} , 図3-5で示した2種類の工具についてカタログ基準条件値を A_{c1}, A_{c2} としたとき、 $A_{c1}/A_{c1} = A_{c2}/A_{c2} = 1$ を満たす。表2の切削条件値より、図3-5で示した2種類の工具について $A_a/A_{c1}, A_b/A_{c1}, A_{ab}/A_{c1}$ および $A_a/A_{c2}, A_b/A_{c2}, A_{ab}/A_{c2}$ を求めた結果をレーダーチャート方式で図3-6, 図3-7に示す。表3-2より、B社の推奨するカタログ基準条件はA社に比べて高速切削を推奨している。そのため、B社

のラジラスエンドミルの材料除去率 MRR は A 社のラジラスエンドミルの 2.6 倍であった。レーダーチャートより、A 社のデータベースからデータマイニングにより導出された切削条件は、B 社のデータベースから導出された切削条件と比べて材料除去率で約 2 倍ほど高能率である。A 社 B 社混合データベースより導出された切削条件は A 社と B 社のほぼ中間に位置することがわかった。A 社の切削条件式から得られるラジラスエンドミルの切削条件はカタログ基準条件に近く、高能率な値が導出されていることがわかる。しかしながら、B 社の切削条件式から導出された切削条件は、材料除去率からみると A 社のラジラスエンドミルのカタログ基準条件の 64%、B 社の 25%ほどであり、材料除去率が悪い。B 社の切削条件式によって導出された軸方向切込み量 Ad および径方向切込み量 Rd はカタログ基準条件や他社の条件に比べて 20%~40%ほど大きい、切削速度 V は 1/2 以下の値が導出されている。図 3-3、図 3-4 の結果から、ねじれ角 θ と刃数 z に負の相関があることから、図 3-5 に示すラジラスエンドミルでは切削抵抗の低減による高速切削を実現するため刃数枚数とねじれ角の大きさは他のエンドミルに比べて大きく設計されている。そのためラジラスエンドミル工具パラメータを用いて B 社の切削条件決定式から導出した場合、切削速度はカタログ基準条件より低い値が導出されることから、図 3-3、図 3-4 から得られた相関関係は妥当であると考えられる。

3-4-3. 切削可能な領域線図の提案

図3-8にA社およびB社の切削速度 V の切削条件決定式に、表1に記載されている説明変数のデータ範囲をすべて代入した結果導出された値（マイニング条件）と、データベースであるA社およびB社の工具カタログに記載されている基準条件（カタログ条件）の関係を示す。図中の赤丸は、実際に切削条件式から図3-5に示す工具の切削条件として導出された値を示す。図中の対角線は切削条件決定式から導出される値とカタログ基準条件が一致する値を示す。図3-5に示すB社のラジラスエンドミルのカタログ基準切削速度は、同じクラスタに属するエンドミルの中で一番大きな値である。またB社において、図3-5に示す高速切削用ラジラスエンドミルの数は他の目的で使用されるエンドミルの20%ほどしかない。よって、B社の切削条件決定式から導出されるラジラスエンドミルの切削速度は200 m/min以下であり、カタログ基準条件と近い値もしくは高能率な値の導出は不可能であり、本章の工具パラメータではカタログ基準条件より低い側の100 m/min程度の低速な条件が導出されている。図3-8より、切削速度の推奨条件決定には、各社である基準が存在していることが考えられる。通常、

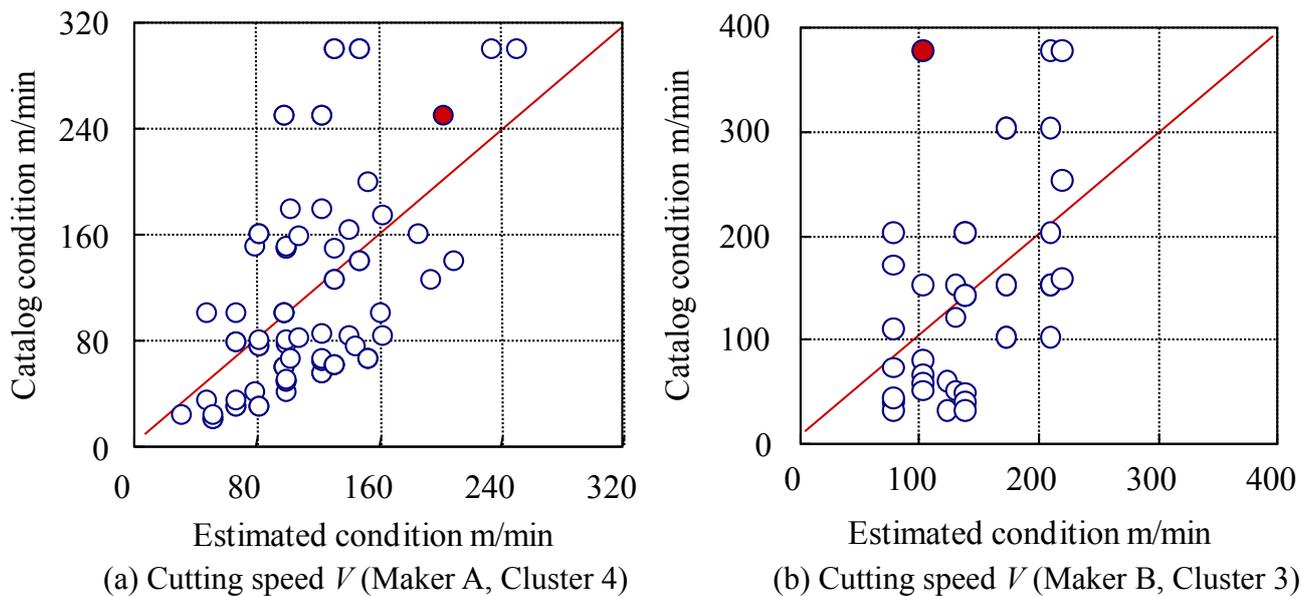


Fig. 3-8 Relationship between catalog (maker-recommended) and mined conditions

工具カタログにおいて、各推奨条件は工具外径 D と被削材硬さ HRC によって整理されている。ここで工具カタログが推奨する切削条件を工具外径 D が異なる工具についても調べた結果、ある一定の切削速度（ πDS 値は D が変化しても一定）が推奨される傾向があり、被削材硬さ HRC の大小によって推奨される切削条件域が変わる傾向にあった。本章では、工具外径 D は $\phi 10$ に固定化されているため、切削速度の条件決定には被削材硬さ HRC が有意であることが考えられる。図3-8より、工具カタログでは高速切削においてA社では240 m/min, 300 m/minが推奨され、B社では300 m/min, 380 m/minが推奨されていることから、ラジラスエンドミルによるダイス鋼の高速切削においてはB社のほうが切削能率がよい。図3-4よりA社では被削材硬さ HRC と切削速度には負の相関がみられるが、B社では正の相関がみられる。またB社では HRC よりも全長 L や刃数 z 、ねじれ角 θ が切削速度には有意であることから、切削条件決定行列式には HRC が含まれていない。この傾向はA社B社データベースを混合した結果についても同様である。データベースを混ぜたことにより、同じ被削材を加工するにあたって推奨される切削速度の幅が広がり、切削速度と HRC の相関関係よりも刃数やねじれ角などの刃部の剛性に関する工具パラメータの相関が高くなる。刃先剛性の高いラジラスエンドミルは、他のスクエアエンドミルに対して外れ値的な位置づけにあることがわかった。

カタログ基準条件を用いれば必ず安定した切削が行えるとは限らない³⁶⁾。カタログが推奨する切削条件はあくまで基準であり、現実問題として、使用する工作機械の能力や剛性、

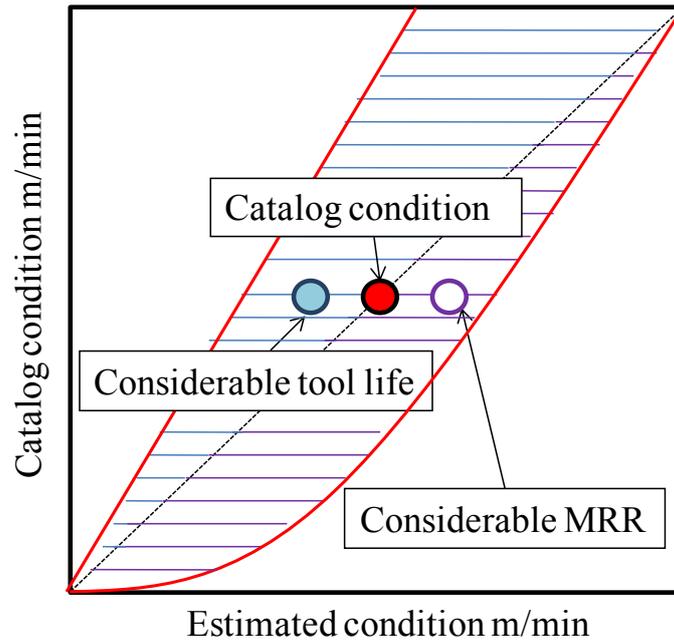


Fig. 3-9 Feasible milling area in terms of cutting speed V

被削材形状，クランプ方法，加工コスト，納期，切りくず処理などといった切削条件を決定する各要素を考慮して，技能者がカタログ推奨条件を調整するのが一般的である．そのため目的に合った最適な切削条件には幅が存在している．図3-8に示したマクロな関係に基づき，カタログ推奨条件を基準としたときの有効切削条件域を可視化した線図を図3-9に示す．切削条件決定式より導出される切削条件値に注目し，対角線からみて右側に条件値がある場合は，高能率な切削条件であり，カタログ基準条件の120%程度を目安にして示している．左側にある場合は切削寿命を重視した条件であり，カタログ基準条件の60%程度を目安にして示している．切削条件決定式より導出された値が横線の範囲内に存在するならば，切削可能であり，使用工作機械性能や加工目的に合わせて調整することで，適切な切削条件設定をより迅速に行うことができると考えられる．A社，B社の切削速度 V の切削条件決定式の決定係数は共に0.5未満であるが，図3-9のような切削可能範囲を考慮した場合，決定係数の大きさは，切削条件決定式の予測精度を判断するのにさほど重要でないことがわかる．

3-5. 結言

工具カタログデータに対して，非階層・階層クラスタリング手法を組み合わせたデータマイニング手法の適用を提案し，新しいクレンジングの1つとして切削条件決定の際に自明であると考えられる変数を固定（工具外径 D を $\phi 10$ ）する手法を試みた．すなわち，ラジラス

エンドミルの切削条件決定に新しいクレンジング手法を適用した結果, 以下の結論が得られた.

- (1) 自明な変数を説明変数から除外するデータクレンジング手法により, 切削工具メーカーごとの切削条件設定の特徴を抽出することが容易となることがわかった.
- (2) 目的変数の中で, 速度の次元を有する変数が重要で, その中でもとくに切削速度の導出が困難であり, 切削条件決定において重要になることがわかった. また, カタログ推奨値の特徴として, 切削速度に関しては刃部コーティングを含んだ工具の材質と被削材の材質の組み合わせによって一定値を示すこともわかった.
- (3) カタログマイニングにより導出された切削条件決定式は単にカタログ値を予測する精度が重要ではなく, 工具寿命重視または加工能率重視など, 切削条件を変更しようとする際に重要な指針となることがわかった. さらにその目安を示す可視化線図を提案できた.

第4章 粗加工用切削条件決定支援システムの提案

前章までに、工具カタログデータに、非階層・階層型のクラスタリング手法を適用した切削条件決定支援システムを提案した。2章では、工具カタログに記載されている工具形状を表すパラメータから工具を分類し、工具メーカーが推奨する切削条件と線形関係にある重要なパラメータを効率的に抽出し、重回帰分析により切削条件決定行列式を導出した。3章では、新しいデータクレンジングの試みとして、従来の経験により、切削条件決定に有意である変数（工具外径 D ）を固定する手法を提案し、その陰に隠れた他の工具パラメータが有する切削条件決定への影響度合いを、主成分回帰により定量的に考察した。本章³⁷⁾³⁸⁾では、切削条件決定式により導出された切削条件の妥当性を検証するため、金型鋼を対象に切削実験を行い、切削後の切りくず形状および切れ刃形状、表面粗さにより評価した。

4-1. 緒言

CAMシステムの発達により、熟練技術者でなくてもエンドミル加工において必要なNCプログラムを容易に生成することが可能となったことは前章においても言及した。ここで使用工具や切削条件とは切削温度、切削抵抗、それらに起因して発生する工具磨耗の進展やびびり振動に影響する重要な因子である。それらの決定は熟練技術者の知識や経験に頼っているのが現状である。熟練技術者はコストや納期、加工物表面性状を満足できる最適な切削条件を決定するために、被削材料の物性値や加工形状、使用する工作機械の剛性、クーラントの有無、エンドミル母材の材質、コーティング膜の性能、エンドミルの刃先形状や工具形状、コレットによる工具保持方式などを考慮して、試行錯誤的な切削実験により決定しなければならない³⁹⁾⁴⁰⁾。これらの決定に要する熟練技術者の知識や経験は、暗黙知的で体系化されていない場合が多いため、非熟練技能者には伝承されにくいことが問題である。とくに、工程設計の中で最初に行われる粗加工においては、材料除去率（ MRR ）を最大化することを重視して切削条件が決定される場合が多い。粗加工用の切削条件決定の際、切削工具メーカーが工具カタログ上で推奨する切削条件が基準となることが多い。工具カタログ上で推奨する粗加工用の切削条件群は、熟練技術者によって試行錯誤的に切削実験を行った結果得られ、使用工具と被削材の組み合わせで材料除去率が最大となる効果が得られる条件である。

前章までにおいて、膨大なデータを有する工具カタログに対して、非階層・階層クラスタ

リング手法を併用したデータマイニング手法による切削条件決定支援システム(カタログマイニングシステム)を提案している¹⁹⁾²⁰⁾。現象に対して支配的な要因を見つけ出すことによって、最適条件を決定する研究は、過去におおく行われてきたが¹⁶⁾¹⁷⁾⁴¹⁾、予測精度に影響する学習データ数や隠れ層の設定が解析者の知識や経験に影響するため、予測結果が大きく変化することが多く、再現性の観点から実用性に欠けると考えられる。

一方で、カタログマイニングシステムにより、エンドミル工具形状から視覚的に切削条件を決定することが可能であり、加工の知識の少ない非熟練技術者であっても、迅速に切削条件を決定できることを示している¹⁹⁾。また切削条件の決定に関して、工具外径や被削材硬さが有意なパラメータであることがわかっている³¹⁾。しかしながら、前章までの考察では、カタログマイニングシステムによって導出された切削条件が実際の加工に対して実用的であるのかの十分な検証には至らなかった。そこで本章では切削条件決定支援システムにより得られた切削条件の実用性の検証のため、焼き入れ鋼(JIS SKD61)を対象に、粗加工の主流であるスクエアエンドミルを用いた高速切削加工を行った。またカタログマイニングシステムによって導出された切削条件(マイニング条件)、工具カタログ推奨切削条件(カタログ条件)および熟練技術者が試行錯誤的に導出した最適切削条件(エキスパート条件)により加工された工作物の加工面粗さ、加工後のエンドミル切れ刃および切りくず形状を比較考察した。

4-2. カタログマイニングプロセス

提案するカタログマイニングプロセスを図4-1に示す。本章では2章に示す図2-1を基本としている。各手法の具体的な計算アルゴリズムは前章にて詳述しているため省略する。前章において定義した、単位時間当たりの材料除去率 MRR も考察に加える必要性が判明している。そこで、本章では変数クラスタ分析に新たに MRR を考慮する点が変更点であり、以下に簡略的に説明する。

データベースとして、工具カタログに記載されている、粗加工用超合金製エンドミルを選択した。ターゲットデータとして、2章に比べて1年進んだ当時最新版の国内大手A社2010-2011年度版の工具カタログから超合金製スクエアエンドミルを選択した。カタログに切削条件が記されているデータ(総数は3431項に及ぶ、工具径で0.1mm~50mm)をデータベースとした。図4-2にスクエアエンドミルの工具形状モデルを示す。2章と同様に、ロングネックタイプのスクエアエンドミルについては先端の有効長さ部分のみの工具形状を

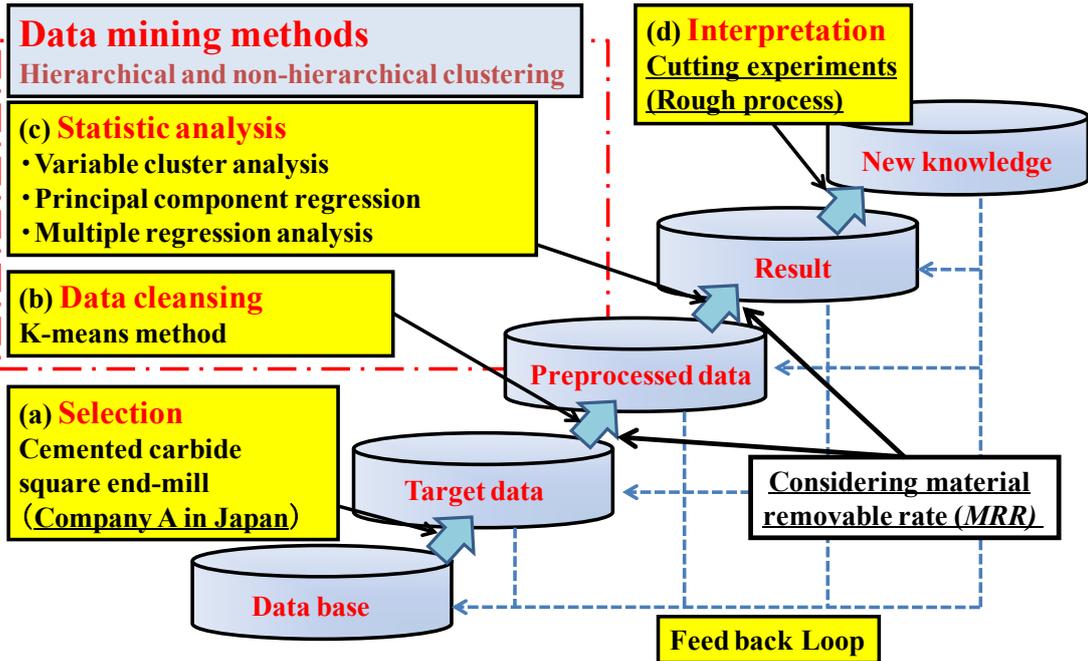


Fig. 4-1 Catalog mining process proposed in this chapter

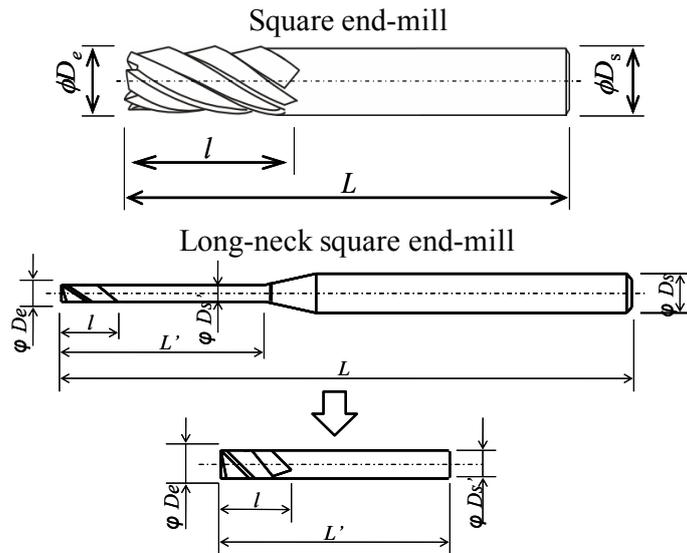


Fig. 4-2 Tool shape parameters of each end-mills

考慮し、首径がシャンク径、首下長さを全長とした。ロングネック形状のデータ数は 567 項で超硬合金製エンドミル全体のデータの約 25%を占める。工具カタログには外径 D mm, 刃長 l mm, 全長 L mm, シャンク径 D_s mm, 刃数 z , ねじれ角 θ などの形状データと対象とする被削材の種類が記載されている。これら形状に関する変数全てを初期の対象説明変数とした。また、被削材の種類として $HRC32\sim60$ までの炭素鋼, 合金鋼, 焼入れ鋼を対象とし、その硬さ HRC を説明変数として加えた。さらに図 4-1 に示すように、3 章で定義した切削効

率の目安となる材料除去率 (MRR cc/min) を、工具カタログが推奨する各切削条件から算出し説明変数とした。目的変数は、重要な加工条件因子である切削速度 V m/min, 主軸回転数 S rpm, 一刃当りの送り (以後送り量と称す) f mm/tooth, テーブル送り速度 F mm/min, 軸方向切込み量 Ad mm, 側面加工では径方向切込み量 Rd mm も目的変数とした。切削速度 V は $V = \pi DS/1000$, 送り量 f は $f = F/(S \cdot z)$ で算出されるため、相関が明白な変数も含まれている。

工具カタログに記載されている工具形状パラメータを説明変数とし、重要な加工条件因子であるカタログ基準切削条件を目的変数として、切削条件予測式を構築する。まず、上述のデータベースに対して、非階層型クラスタリング手法である K-means 法によって工具形状によるビジュアル的なクラスタ分けを行った。ここで K-means 法におけるクラスタ分けとは、似た工具形状の特徴をあらわすデータを抽出することを意味する。このとき、エンドミル工具形状の特徴をあらわすクラスタの数は5つとした。エンドミルの形状寸法の比を視覚化するため、 L/l , l/De , Ds/De , 刃部コーティングの4つの係数を導入した。前章と同様に、K-means 法による特徴抽出のための変数として、刃部を同面積の円に置き換えた時の円の直径を相当径 De mm と定義した。 De は刃部の芯厚を定量化した変数であり、刃数が多いほど De は D の値に近づく。これら4つの変数により、スクエアエンドミルの外観形状を特徴的に決定できる。K-means 法には (株) 数理システムの Visual Mining Studio を用いた。次に統計解析手法として、階層型解析手法である変数クラスタ分析により、K-means 法によって抽出された各クラスタに対して、変数間のデータ構造の階層を樹形図によりビジュアル化し、主成分回帰により説明変数間の相関関係を定量的に示した。非階層・階層型クラスタリング手法を併用することにより、目的変数と線形関係にある説明変数を効率的に工具カタログから抽出し、抽出された有意な説明変数を用いて、重回帰分析により切削条件決定行列式を作成できる。あるエンドミルの工具形状パラメータを切削条件決定行列式に代入することによって、カタログ推奨条件から、システム総合的に平均化された切削条件を迅速に導出することが可能である。導出された切削条件決定行列式の妥当性の検証のために、検証実験用エンドミルを対象に切削条件を導出し、その切削条件を用いて金型鋼の切削実験を行った。

4-3. カタログマイニング結果および考察

4-3-1. 工具形状によるモデル化とクラスタリング

クラスタ数を5つとして、スクエアエンドミルを工具形状比によりクラスタ分けした結果

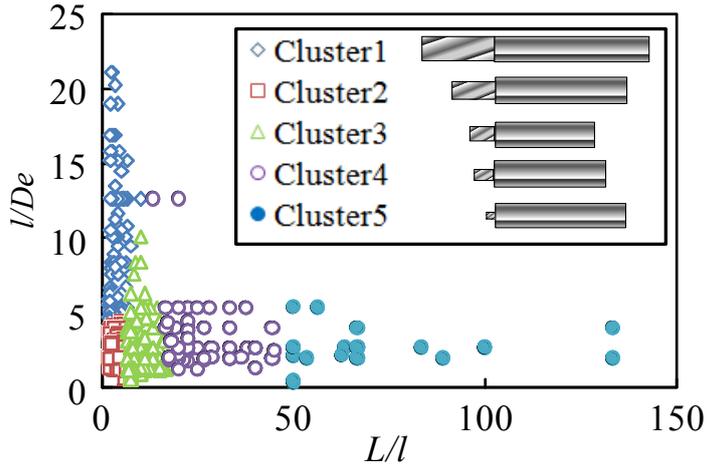


Fig. 4-3 Relationship between L/l and l/De

Table 4-1. Results of clustering by K-means method

Cluster	Data	L/l	l/De	Ds/De
1	507	3	6	2
2	1933	4	3	1
3	737	9	2	2
4	183	24	3	7
5	71	70	3	19

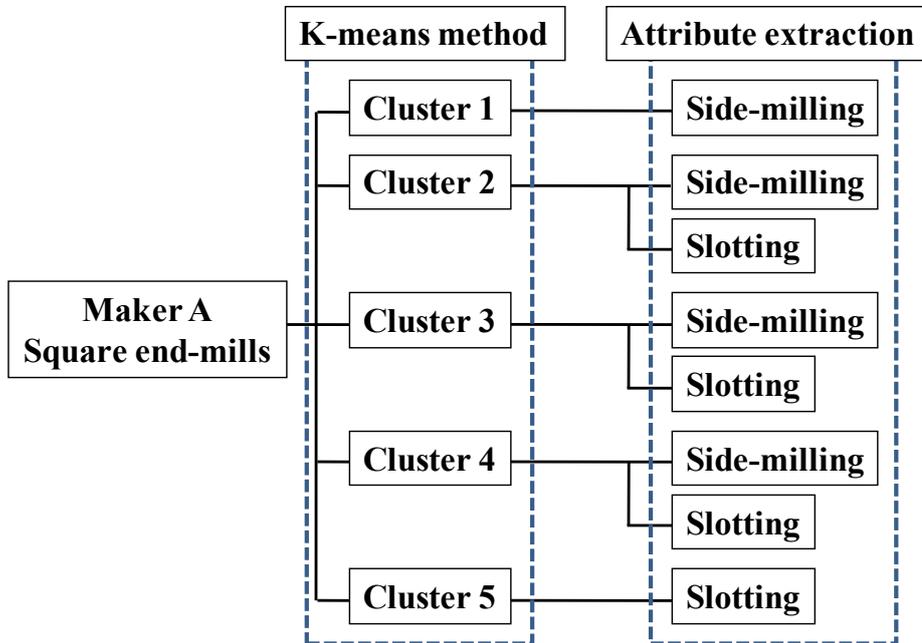


Fig. 4-4 Attribute extraction for each clusters

を図 4-3 に示す。また表 4-1 に各クラスターのデータ数および各係数の平均値を示す。クラスター 1, 2 を構成するほとんどの工具は、 D と D_s の比が 1 の段付きのない工具である。クラスター 3 を構成するエンドミルのうちの 60% は段付きのないエンドミルであるが、残りはシャンク径が 6mm 以下の段付き形状のエンドミルが含まれている。クラスター 1 には刃数 z が 2 枚刃で刃長の長い立壁切削用のエンドミル (l/De 大) がクラスター 2 に比べて多く含まれている。クラスター 2 はすべての工具の 56% をしめているため一番データ数が多く、なかでもクラスター 1 や 3 に比べて、刃数 z の多い高速切削粗加工に適した工具が多く含まれている。クラスター 4 および 5 は工具径 D が 1.0mm 以下の小径エンドミル (L/l 大, D_s/De 大) によって構成されている。A 社工具カタログにおいて、推奨切削条件は側面加工と溝加工によって分類されている。そのため、図 4-4 に示すように、クラスター 1 と 5 を除く各クラスターにおいて、側面加工用および溝加工用エンドミルとして用途別にさらにデータを 2 分化する。その結果、合計で 8 つの属性を抽出することができる。

4-3-2. 工具形状パラメータからの説明変数抽出

各クラスターにおいて抽出された各属性に対して、変数クラスター分析および主成分回帰により、目的変数（工具カタログ推奨切削条件）と相関関係のある説明変数（工具形状パラメータ）を選択する。

近年の金型鋼の粗加工においては、エンドミルの長寿命化、高能率化の観点から、多刃、強ねじれかつ刃先剛性の高いラジアスエンドミルを用いた高速切削が主流である。そこで、本章ではそれらの工具を多く含むクラスター 2 に注目して、統計解析手法を適用し、切削条件決定式を導出した。クラスター 2 の側面加工および溝加工用のデータに対して、階層型クラスターリング手法である変数クラスター分析と主成分回帰を行った結果を図 4-5、図 4-6 に示す。変数クラスター分析において、階層クラスター形成後の距離は式(2-2)に示すウォード法によって計算した²⁾。

図 4-5 のような樹形図においてカッティング線（破線）で区切った左側の階層クラスターに注目することで、階層クラスターを構成する説明変数の相関関係を知ることができる。図 4-5 より A 社の場合、工具寸法形状を表す説明変数 (D と D_s , L , l) と刃先形状と加工能率の指標となる説明変数 (z と θ , MRR) と被削材の特性をあらわす HRC の 3 つの階層クラスターに分けられる。また、変数同士のつながりの段階が早い階層クラスターほど、変数間の相関関係は大きい。クラスター 2 は段付きのない工具形状のスクエアエンドミルによって構成されている

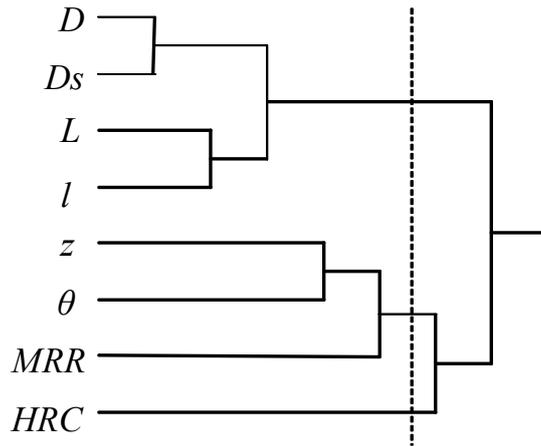
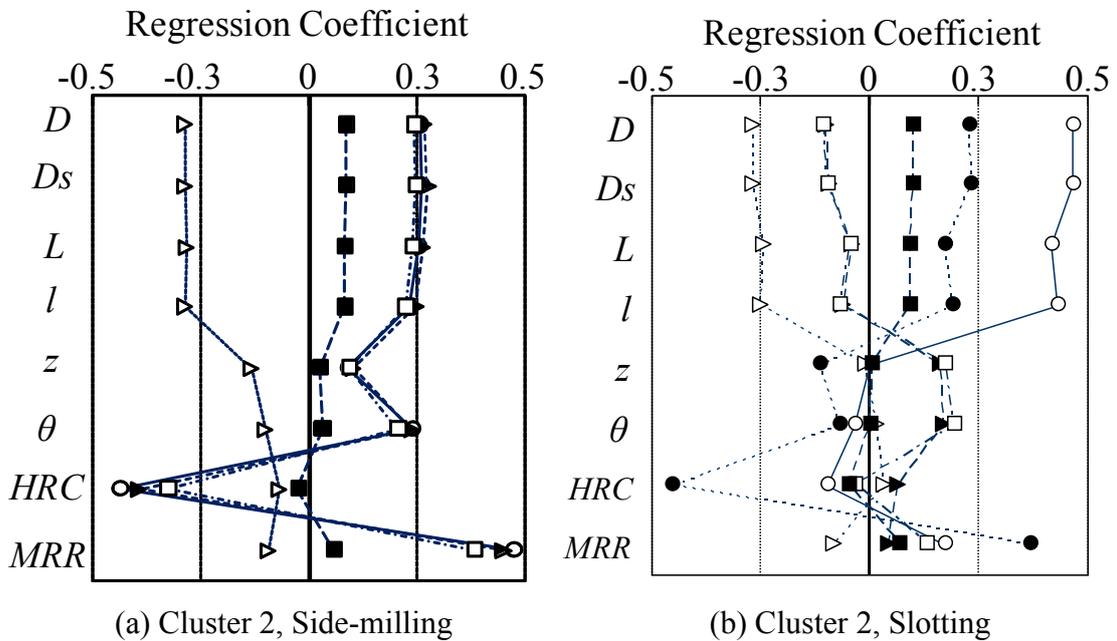


Fig. 4-5 Result of variable cluster analysis (Cluster2, side-milling and slotting)



- Axial depth of cut Ad
- Radial depth of cut Rd
- △— Spindle speed S
- ▲— Table feed F
- Cutting speed V
- Feed rate f

Fig. 3-4 Results of principal component regression

ため、 D と Ds は同値であり相関関係は1で最大である。また HRC が単体でひとつの階層クラスタを形成していることから、他の変数に対して独立していることがわかる。

図4-6について、横軸の回帰係数は説明変数の目的変数への影響度合いを表し、正の値の場合は正の相関、負の値の場合は負の相関を表している。回帰係数の絶対値が大きいほど、相関関係は強い。上述したそれぞれ3つの階層クラスタに含まれる説明変数のなかで、図4-6

より目的変数に対してより相関関係の最も強い変数を各階層クラスタから1つずつ選択する。また図4-5の結果より、*HRC*に関しては、他の説明変数に対して独立であることがわかったので、すべて切削条件決定式に使用することが自動的に決定する。ひとつの階層クラスタを構成する工具寸法形状を表す説明変数 (D と D_s , L , l) は、側面加工および溝加工において、目的変数との相関関係に差はほとんどないことがわかる。そのため、切削条件決定式に用いる変数としては、工具形状寸法の中でも外観で迅速に判断しやすく、前章³⁾で目的変数に対して有意であることがわかった説明変数である D は必ず採用し、残りの非階層クラスタでは、より目的変数に対して相関関係の強い変数を選択した。またもう一つの階層クラスタを構成する刃先形状と加工能率の指標となる説明変数 (z と θ , MRR) については、図4-6から各目的変数について相関の強い変数を選択した。図4-6より、側面切削用のエンドミルにおいて、 HRC と Rd には0.45の負の相関がある。また溝加工用のエンドミルにおいて、 HRC は Ad と V , F に0.4~0.45の負の相関関係がある。このことから、工具カタログが推奨する切削条件において、 HRC が高くなるほど、切り込み量をあらわす Ad および Rd は低めに設定されている傾向が抽出できる。一方で、側面加工において MRR には切り込み量の因子の中でも Rd が0.4の正の相関をもつことから、材料除去率の大きな切削条件設定の傾向としては Rd を多くとることが推奨されていることがわかる。

4-3-3. 切削条件決定行列式の導出

図4-5, 図4-6より、目的変数への影響度合いの大きい説明変数を選択し、重回帰分析により各目的変数に対して切削条件決定式を導出する。前章と同様に、重回帰分析の際に、多重共線性により係数符号の逆転現象をもたらす説明変数に関してはステップワイズ法(変数増減法)により削除した。図4-6よりすべての説明変数が目的変数に対して影響度合いをもつことはないため、多重共線性を無視して説明変数すべてを選択して重回帰分析を行ったとしても、決定係数の向上はみられない。また人間の空間把握能力の限界は3次元であるため、各切削条件決定式の中で、説明変数は最大で3つまでとした²⁾。A社のクラスタ2(側面加工および溝加工)について、導出された切削条件決定行列式を式(4-2), (4-3)に示す。切削条件決定行列式は導出された各切削条件決定式をマトリックス表示したものである。左辺は目的変数ベクトルであり、右辺は切削条件決定に影響する行列と説明変数ベクトルの積と定数項で構成される。式中の R は決定係数を表し、一般的に0.5以上ならば予測式としての精度は十分であるといわれている。

(1) クラスタ2の切削条件行列式 (側面加工)

$$\begin{bmatrix} Ad(R0.79) \\ Rd(R0.30) \\ S(R0.26) \\ F(R0.04) \\ V(R0.04) \\ f(R0.06) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.87 & -0.13 & 0.12 & 0 & 0 & 0 & 2.50 \\ 0.07 & -0.04 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2.39 \\ -222 & 53 & 0 & -132 & 0 & 0 & 7978 \\ -22 & 22 & 0 & 0 & -9 & 0 & 581 \\ 0 & 0.45 & 0 & 0 & 0.58 & -0.81 & 74 \\ 0.002 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.039 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D \\ HRC \\ L \\ l \\ \theta \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4-2)$$

(2) クラスタ2の切削条件決定行列式 (溝加工)

$$\begin{bmatrix} Ad(R0.81) \\ S(R0.44) \\ F(R0.33) \\ V(R0.16) \\ f(R0.28) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.20 & -0.078 & 0 & 0 & 0 & 0.073 & 3.58 \\ 0 & 0 & -192 & 0 & 0 & 0 & 18254 \\ 0 & 0 & -12 & 0 & 251 & 0 & 534 \\ 0 & -1 & -0.4 & 0 & 0 & 0 & 148 \\ 0.0018 & 0 & 0 & 5.5 \times 10^{-4} & 0 & 0 & 0.0078 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D \\ HRC \\ L \\ \theta \\ z \\ MRR \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4-3)$$

Ad を除くと、切削条件決定式の予測精度をあらわす決定係数 R は 0.5 未満であった。とくに速度の次元をもつ S , F , V , f で極めて低い決定係数を示している。幾何学的な変数 Ad , Rd に比べ、これらの変数は切削時の工具の温度上昇などに大きな影響を与えると考えられ、設定においてより慎重な判断が必要であることから、1 次の工具パラメータのみでは決定が困難であることがわかる。側面切削用の条件式においては、 V を除いて D はすべての条件式に含まれていることから有意な変数であることがわかる。側面加工用の切削条件決定式 S について、カタログ条件値とマイニング条件値の関係を図 4-7 に示す。 S の切削条件決定式の R が低いことにより、図 4-7 からマイニングによって導出できる条件値の最高値は 10000rpm 程度であることがわかる。しかしながら、一般的に汎用工作機械として現場で使用される工作機械の最大主軸回転数は 8000rpm~10000rpm が多いことから、条件式を実際に使用する場合には問題ないことが考えられる。

4-4. 切削実験による切削条件決定行列式の妥当性の検討

4-4-1. 切削条件と実験に用いた工具

クラスタ2に注目して、 V , S , f , F , Ad , 側面加工では Rd の4つの切削条件決定式を導出した。そこで金型鋼を対象に、導出された切削条件決定式に工具形状パラメータを代入す

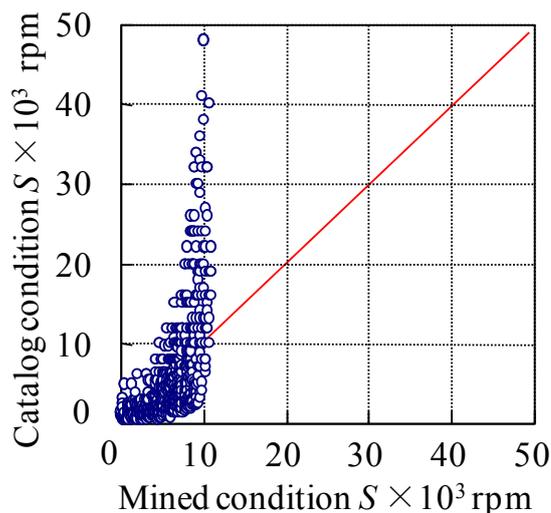


Fig. 4-7 Relationship between catalog value and estimated value
(Cluster2, Side milling, Spindle speed)

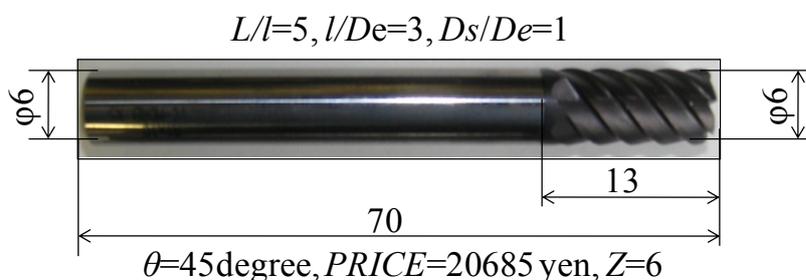


Fig. 4-8 Tool shape parameters used in cutting experiments

ること得られるマイニング条件と、カタログ条件、複数名の熟練技術者が数年間にわたる試行錯誤的な実験と経験により提案したエキスパート条件⁴⁰⁾の3種類において切削実験を行った。3つの条件を用いた理由は、マイニング条件の有用性およびエキスパート条件、カタログ条件に対してのマイニング条件の位置づけを確認、考察するためである。検証に用いたエンドミルには、熟練技術者からのヒアリング調査に基づいて、粗加工に多用され実績のあるエンドミル（D6 ラジアスエンドミル、刃先 $r0.5$ ）を評価対象として用いた。エンドミルの工具寸法および刃先形状を図4-8に示す。この工具はクラスタ2に属している。それぞれの切削条件を表4-2に示す。溝加工において、カタログ条件とエキスパート条件は、 Rd が工具外径 D の6.00 mmとなる以外は側面加工の切削条件と同じであった。

4-4-2. 実験方法および加工形状

図4-8の工具を用いた金型鋼切削に対して、マシニングセンタによって平面の加工（側面：ダウンカット，1方向パス）を行った。工作機械は3軸直行型の立型マシニングセンタである

Table 4-2. End-milling conditions

	Side-milling			Slotting
	Catalog conditions	Expert conditions	Mined conditions	Mined conditions
Spindle speed S rpm	20000	9600	7739	4510
Table feed F mm/min	7200	2304	2368	1082
Cutting speed V m/min	377	181	146	85
Feed rate f mm/tooth	0.06	0.04	0.05	0.04
Axial depth of cut Ad mm	6	4	9	2
Radial depth of cut Rd mm	0.30	0.30	0.50	6.00
Material removable rate MRR cc/min	12.96	2.77	10.46	12.98

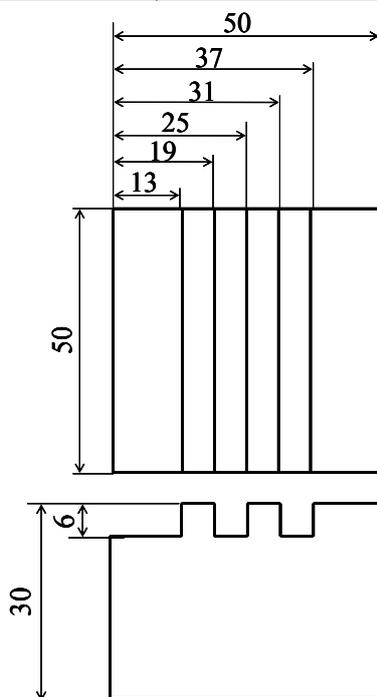


Fig. 4-9 Workpiece shape

ACCUMILL4000（森精機製作所製，最高主軸回転数20000rpm）を用いた．被削材には金型に用いられることが多いSKD61（HRC53）を選択した．また工具突き出し量は30mmとした．工具振れは5 μ m以下である．加工形状を図4-9に示す．今回，側面加工および溝加工用の切削条件を導出したため，側面加工と溝加工を組み合わせた形状を選択した．また図4-9の形状を2つ作成することで，実際の金型のように組み合わせることが可能である．金型加工現場の技術者にヒアリングを行い，面性状を組み合わせた時のクリアランスは0.01mmとなるように設計した．また3種類の切削条件を用いて側面加工における寿命実験も行った．このとき，切削の初期に比べて切削抵抗の合力が2.5倍となる時点を目録とした⁴⁰⁾．

側面加工面（立ち壁）の算術平均粗さ $R_a[\mu\text{m}]$ と最大粗さ $R_z[\mu\text{m}]$ を、表面粗さ測定器 SE-30C（小坂研究所製）を用いて、それぞれ上述の3つの条件について測定した。カットオフ値は 0.8mm，評価長さは 2.5mm とした。また，幾何学的理論粗さ $R_{yt}[\mu\text{m}]$ を $R_{yt}=1000 \cdot (z \cdot f)^2/4D$ によって算出した。ここで， $z \cdot f$ は工具振れを考慮した送り量（工具に 5~10 μm 程度の振れが存在する 경우가多く，その場合の最大の粗さを予想するため）である。

4-4-3. 実験結果および考察

それぞれの切削条件について，切削後の切削関与切刃と切りくずの様子，工作物形状を図 4-10 に示す。マイニング条件，カタログ条件では切削開始直後に高周波音が発生したことから，びびり振動が発生していたことが推測される。溝加工のカタログ条件については，加工中に火花が大量発生したため，加工を中止した。溝加工のマイニング条件においても少量の火花がみられたが，状態は安定しており最後まで加工を行うことができた。図 4-10 より，エキスパート条件において，ほとんど工具は摩耗しておらず，側面加工，溝加工ともにびびり振動を発生することなく安定した切削が行えた。

各切削条件において，寿命実験を行った結果を表 4-3 に示す。表 4-3 より，エキスパート条件が最も長寿命であった。マイニング条件の工具寿命距離はカタログ条件に比べて 16% ほど長く，切り込み量も大きいことから総切削体積はカタログ条件の約 3 倍となった。総切削体積を MRR で除した値である総切削時間は，マイニング条件ではカタログ条件の約 3.5 倍ほどであった。

それぞれの条件について， R_a ， R_z ， R_{yt} をまとめて表 4-4 に示す。表 4-4 より，他の条件に比べて f が低いマイニング条件では， R_z は 3.4 μm であり，他の条件下における R_z に比べて加工面が良好である。しかしながら，切削中にびびり振動が発生していたことから，工具の寿命は熟練技術者推奨条件に比べて短くなったと考えられる。カタログ条件において， R_{yt} よりも R_z が 2 倍ほど大きくなった原因としても，側面加工時のびびり振動が加工面性状に影響を与えていると考えられる。したがって，不安定な切削であったと考えられる。

表 4-2 においてカタログ条件の MRR はエキスパート条件の MRR の 5 倍に相当することから，カタログ推奨条件では切削効率を重視した粗加工を想定している。そのため，切削後の表面粗さは考慮していないと考えられる。一方でエキスパート条件においてはカタログ推奨条件に比べて切削は安定しており，工具寿命距離はカタログ条件の約 10 倍であり，切削時間は約 36 倍である。また仕上げ面も他の条件に比べてよい。マイニング条件ではカタログ

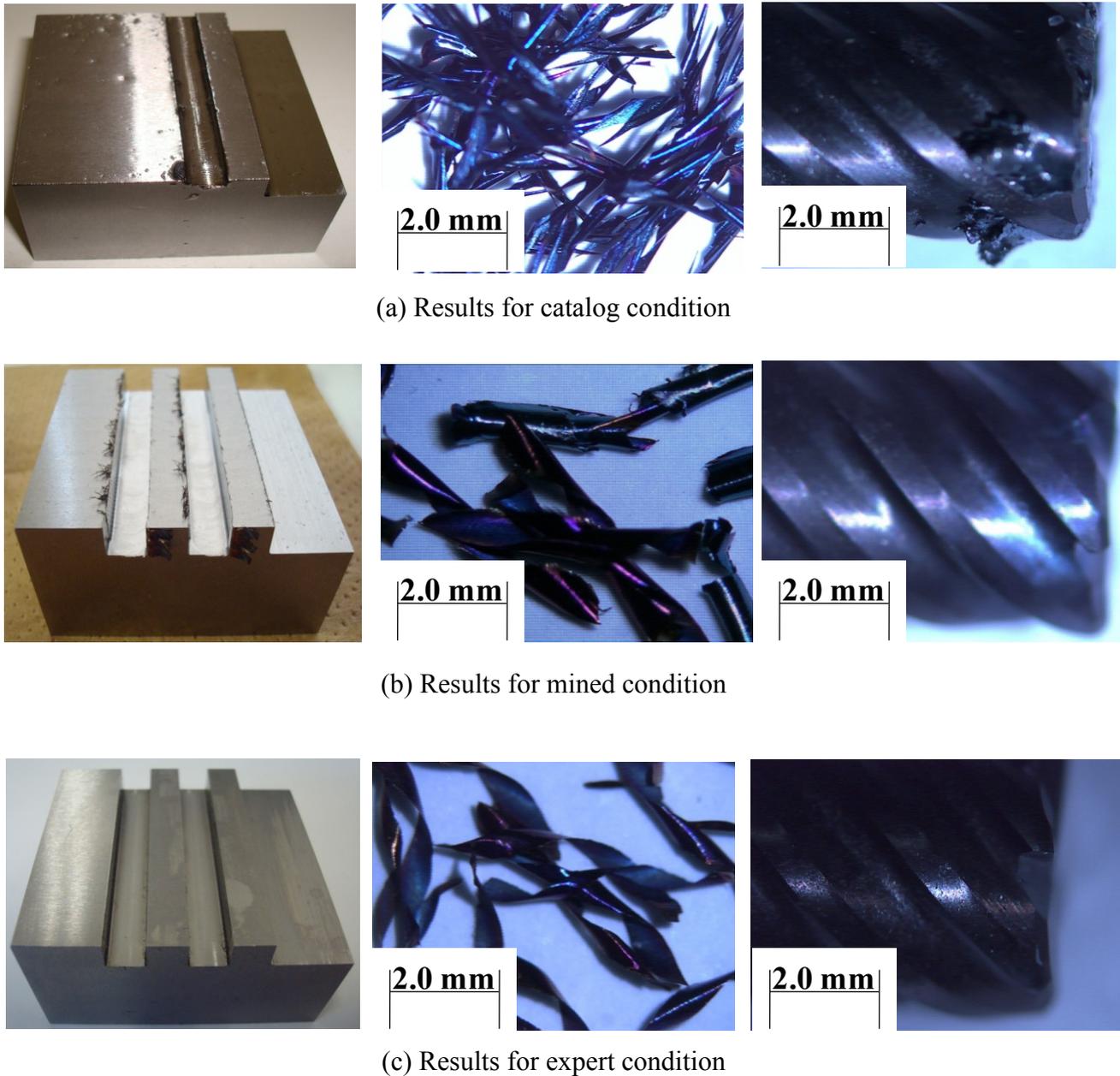


Fig. 4-10 Changes in appearance of chip and cutting edge

条件をデータベースとしているため、似た工具形状のエンドミルからシステム総合的に平均的な解を導出したことになる。そのため、マイニング条件はカタログ条件とほぼ同程度の効率が達成できているが、試行錯誤的に導出されたエキスパート条件のように安定した切削は行えない。しかし、エキスパート条件を導出するまでに、現場においては長期の場合に数年間もの試行錯誤的な実験が必要になることから、工具や工作物を余分に消費することで、コストや期間がかかる。その点、マイニング条件はいったん切削条件式を作成してしまえば、それに工具パラメータを代入するだけで迅速に切削条件を導出できるため、試行錯誤的な実

Table 4-3. Results of tool life experiments for each end-milling conditions

	Catalog condition	Expert condition	Mined condition
Tool life m	43	500	50
All removable volume cm ³	77	600	225
All milling time min	6	217	22

Table 4-4. Results of surface roughness test

	Catalog condition	Expert condition	Mined
Calculated average roughness Ra μm	1.6	0.4	0.5
Maximum height Rz μm	12.0	4.6	3.4
Geometric theory roughness Ryt μm	5.4	2.5	3.8
Feed rate f mm/tooth	0.06	0.04	0.05

験の低減が可能である。また表 4-3 よりマイニング条件はカタログ条件よりも、長寿命かつ高能率な条件であるだけでなく、加工面粗さもカタログ条件に比べて良好であることがわかる。以上より、カタログマイニングシステムによって導出された粗加工用切削条件は、最適な切削条件決定に至るまでの指標として実用的であることがわかった。

4-5. 結言

工具カタログデータに対して、非階層・階層クラスタリング手法を組み合わせたカタログマイニング手法を適用し、金型鋼の高速粗加工に適したラジラスエンドミルの切削条件を導出した。導出されたマイニング条件とカタログ条件、エキスパート条件（複数名の熟練技能者の試行錯誤的な現場の実験によって導かれた条件）について、材料除去率と加工面粗さの観点から比較検証した結果、カタログマイニングシステムによって導出された粗加工用切削条件は、最適な切削条件決定に至るまでの指標として実用的であることがわかった。

第 5 章

LCA によるエンドミル加工条件決定の環境負荷低減技術

前章において、工具カタログデータに、階層・非階層型のクラスタリング手法を適用した切削条件決定支援システムを提案し、導出された切削条件の有用性を示すに当たり、JIS SKD61 を対象とした切削実験により比較検証してきた。本章^{42)・44)}では、切削条件決定式により導出された切削条件の妥当性を環境影響負荷の観点から検証するため、金型鋼を対象に、カタログが推奨する切削条件 (Catalog condition)、マイニングによって得られた切削条件 (Mined condition)、実験計画法を用い得られた最適切削条件 (Optimum condition) の 3 種類の切削条件に対して切削実験を行うことによりその差を考察した。

5-1. 緒言

近年、生産分野において高効率、低コストを目指した生産工程が求められるだけでなく、持続可能なものづくりとして環境面も考慮されるようになってきている。金型加工においては、CAM システムの発達により、熟練技術者でなくても比較的容易に NC プログラムを生成することが可能となった。しかし、加工を行う際に重要となる使用工具や切削条件の決定については未だ熟練技術者の知識や経験に頼っているのが現状である。また、それらは暗黙知である場合が多く、非熟練技術者は試行錯誤を繰り返して最適な使用工具と切削条件の決定を行わざるを得ない。この試行期間において、工具、電力や時間を無駄に消費してしまうため、製造コストの増加だけでなく、環境負荷の増大にもつながっているものと考えられる。

21 世紀は環境負荷が小さい生産物や生産過程がより主流となり、ISO14001 では生産分野における CO₂ 排出量を最小にすることを要求される。工作機械分野での研究においては、プロセスレベルとシステムレベルの改良により成果を挙げる。例えば、MQL 加工や Cold Jet 加工といったプロセスレベルでの環境負荷を評価する研究がある^{45)・49)}。また、工作機械のシステムレベルでは加工法としてエンドミル加工、ドリル加工、旋盤加工が挙げられる^{50)・51)}。他に、工作機械の様々なシステムの環境負荷を予測する研究がある^{52)・53)}。この環境負荷予測システムはすでに製造過程で適用されている。しかし、金型生産における試作段階における工具や工作物の消費、廃棄を考慮した環境影響評価の研究はほとんどされていない。ものづくりにおいて環境負荷の低減技術の確立が求められていることから、適切な使用工具や切削

条件を短期に無駄な試し切削を最小にして決定することを支援するシステムの構築は重要と考えられる。

そこで本章では環境への影響を定量的に評価する手法である LCA を用い、カタログが推奨する切削条件 (Catalog condition), マイニングによって得られた切削条件 (Mined condition), 実験計画法を用い得られた最適切削条件 (Optimum condition) の 3 種類を環境負荷の観点から評価を行い、本システムの有効性を地球環境負荷低減の視点より検討する。また従来の研究では考慮されることのなかった、工具の消耗に起因する環境負荷も含めた考察を遂行する。

5-2. 切削条件と実験手順

4 章の式(4-2)および式(4-3)に工具形状パラメータや被削材の硬さを代入することによって得られた切削条件 (Mined condition), 実験計画法を用い得られた最適切削条件 (Optimum condition), カタログが推奨する切削条件 (Catalog condition) の 3 切削条件を用い環境負荷の観点から評価する。環境負荷を最小にする最適切削条件を導出するため実験計画法を用いた。その際に行った切削実験の概略および使用工具 ($D6\text{mm}$, $D10\text{mm}$) を図 5-1 に示す。この工具は 4 章に示すように、各クラスタの中で 1 番データ数が多い段付き形状のないクラスタ 2 に属する。実験は 4 章と同様に ACCUMILL4000 (立形 3 軸 MC) でを行い、その基本仕様を表 5-1 に示す。また主軸が BT30 の工作機械のため、工具ホルダーはスプリングコレットタイプである BT30-NBS20-60 (ユキワ精工製) を用いた。

まず、切削実験を行う際に被削材の形状を考える必要があり、加工時の工作機械の消費電力を評価するために提案されている日本工業標準仕様書 (TS) のサンプルワークを参考にした⁵⁴⁾⁻⁵⁶⁾。このサンプルワークを図 5-2 に示す。これは、マシニングセンタで想定される標準的な加工例として、S50C の角材 ($120\times 120\times 50\text{mm}$) の加工を対象に設定され、標準的な加工として、フェイスミル ($D125\text{mm}$) で面をならし、その後に 2 種類のエンドミル ($D10\text{mm}$, $D16\text{mm}$) で長さ 20mm の 3 溝を各々切込み $1, 2, 3\text{mm}$ の溝加工, 2 種類のドリル ($D10\text{mm}$, $D16\text{mm}$) で深さ 20mm のドリル加工を行い、異なる工具による消費電力の差異を調べることで、工作機械の消費電力特性が検証されている。

本章では、エンドミルの側面加工及び、溝加工における工具寿命、消費電力が必要な測定データであるため、図 5-2 を参考にしながらフェイスミルおよびドリルの工程を省略して、SKD61 の角材 ($124\times 124\times 50\text{mm}$) を用い、図 5-3 のように設定した。図 5-3 より、まず $D6\text{mm}$ のエンドミルで、上面から 6mm を外形 $120\times 120\text{mm}$ にするため、4 端を側面加工し、上述

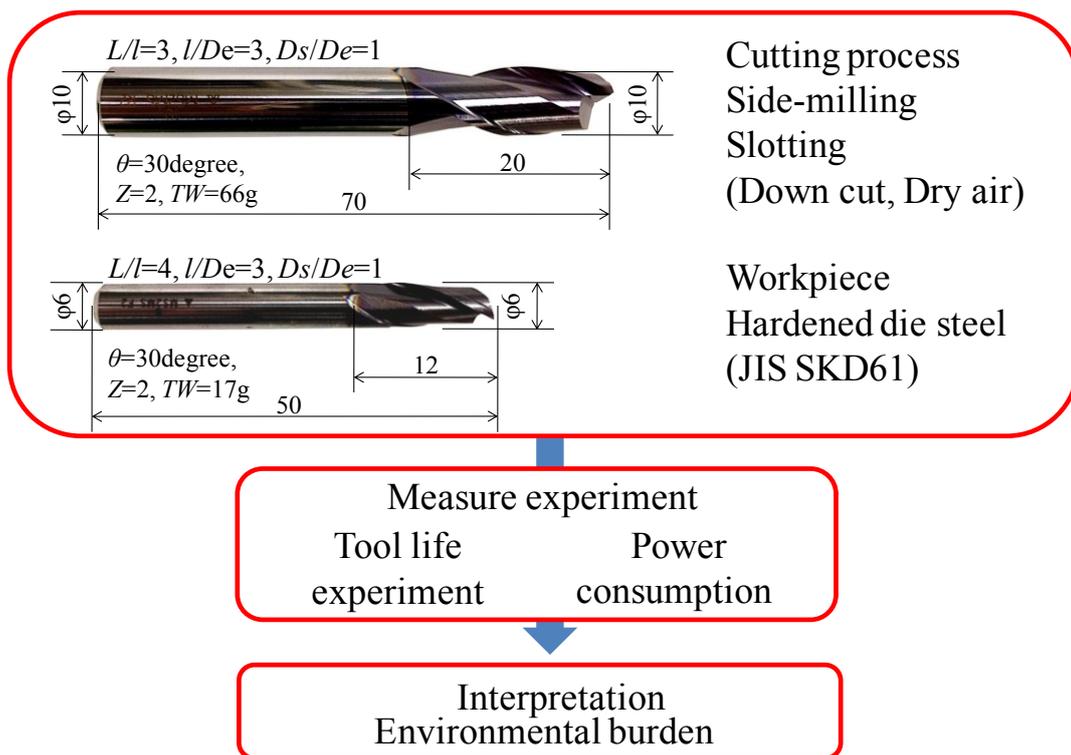


Fig. 5-1 Availability verification flow

Table 5-1. Basic specification for ACCUMILL 4000

Max spindle speed rpm	12000
cutting speed mm/min	48000
Rapid feed mm/min	X, Y, Z: 48000
Net weight kg	3000
Tool shank form	BT-30
Stroke [X,Y,Z] mm	560,430,350

した日本工業標準仕様書 (TS) のサンプルワーク形状にする。その後、日本工業標準仕様書 (TS) と同様に 2 つのエンドミルを用いて、被削材上面に長さ 20mm の 3 溝を溝深さが各々 1, 2, 3mm に達するまで溝加工を行った。今回溝加工に用いた 2 つのエンドミルは図 5-1 に示す D6mm と D10mm である。これら D6mm 側面加工と D6mm と D10mm 溝加工 3 つの加工を実験計画法により設定した切削条件を用い、消費電力、工具寿命を測定した。この測定結果から環境負荷を低減する最適切削条件を得るための定量化として、LCA 手法を用いた。

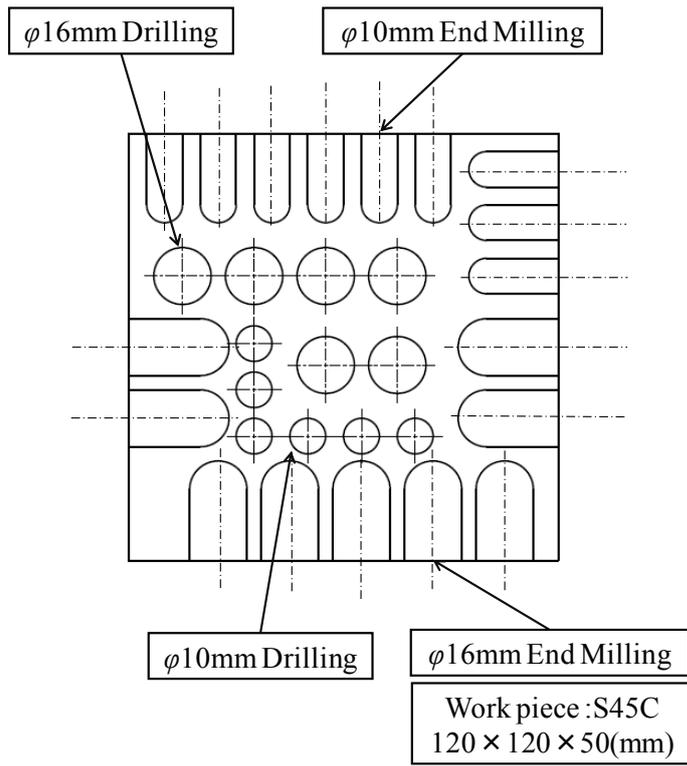


Fig. 5-2 Sample workpiece

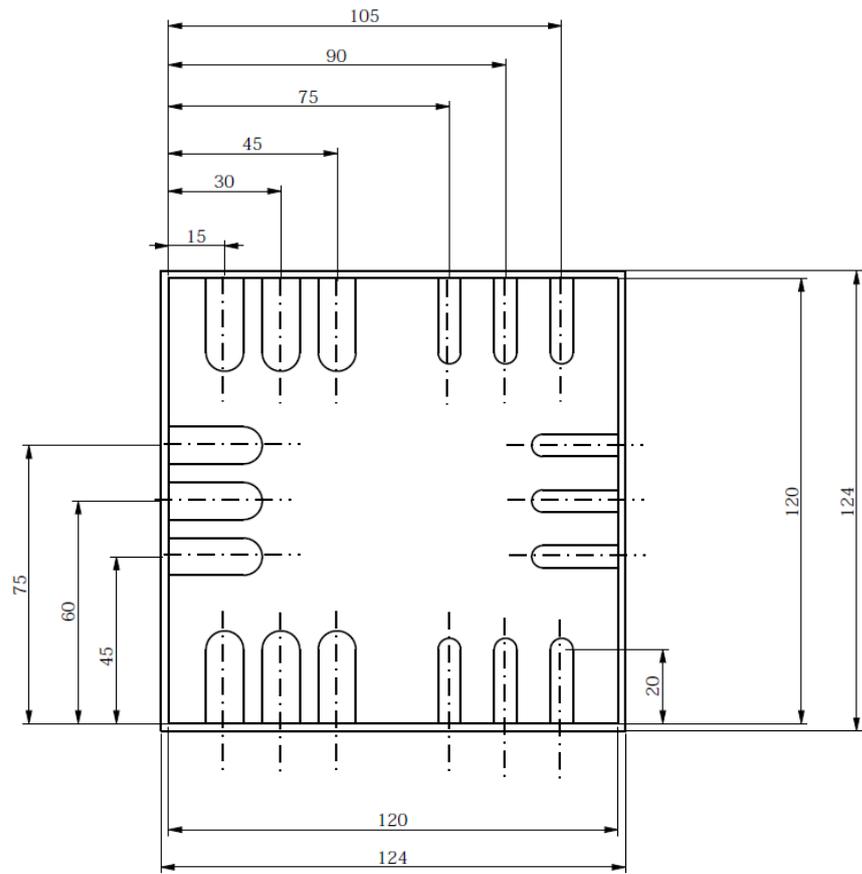


Fig. 5-3 Model shape defined in this chapter according to sample workpiece

Table 5-2. Latin square design

	B1	B2	B3
A1	C1	C2	C3
A2	C2	C3	C1
A3	C3	C1	C2

Table 5-3. Orthogonal table

	A	B	C	D
Test1	1	1	1	1
Test2	1	2	2	2
Test3	1	3	3	3
Test4	2	1	2	3
Test5	2	2	3	1
Test6	2	3	1	2
Test7	3	1	3	2
Test8	3	2	1	3
Test9	3	3	2	1

5-3. 実験計画法

新製品の開発・設計段階においては、設計のパラメータを決めるために実験が行われる。生産現場では、製造条件と製品品質との関係を調べるために実験が行われる。このように与えられた実験目的に対して効果的な条件設定をし、得られた実験データから解析を行うことが実験計画法の目的であり、例えば、因子の数が多くなるとその水準組合せの数は多くなり、相当な実験回数を要求される。そこで、ラテン方格法や田口玄一氏らによって発展させられた直交表を用いることで効果的に実験回数を減らし、本章では、環境負荷が最小となるような最適条件を導出した。

このような実験計画法を用いる際に、因子と水準を決定する必要がある。図 5-3 より NC プログラムを作成時に側面加工においては 4 因子 S , F , Ad , Rd を決定し、溝加工では 3 因子 S , F , Ad を決定するため、4 因子では直交表、3 因子ではラテン方格法を用いた。ラテン方格法を表 5-2 に示し、直交表を表 5-3 に示す。また水準はカタログを基準にし、溝加工は側面加工の切削条件から S は 50-70%, F は 40-60% 下げて使用と記載されているため、 S は 50%, 70%, 100% 下げ, F は 40%, 60%, 100% 下げた 3 水準をとった。 Ad , Rd は図 5-3 に示す形状が創生されるまでの工程および切削回数を考慮した 3 水準をとった。同様に側面加工もカタログを基準にし、 S は 60%, 80%, 100% 下げ, F は 50%, 70%, 100% 下げた 3

Table 5-4. Orthogonal table of side-milling ($D6$)

	Spindle speed rpm	Feed mm/min	Axial depth of cut mm	Radius depth of cut mm	MRR cc/min
Test 1	4200	350	2.0	0.10	0.07
Test 2	4200	490	3.0	0.20	0.29
Test 3	4200	700	6.0	0.25	1.1
Test 4	5600	350	3.0	0.25	0.26
Test 5	5600	490	6.0	0.10	0.29
Test 6	5600	700	2.0	0.20	0.28
Test 7	7000	350	6.0	0.20	0.42
Test 8	7000	490	2.0	0.25	0.25
Test 9	7000	700	3.0	0.10	0.21

Table 5-5. Latin square design of slotting ($D6$)

	Spindle speed rpm	Feed mm/min	Axial depth of cut mm	MRR cc/min
Test 1	3500	280	0.10	0.17
Test 2	3500	420	0.20	0.50
Test 3	3500	700	0.25	1.1
Test 4	4900	280	0.20	0.34
Test 5	4900	420	0.25	0.63
Test 6	4900	700	0.10	0.42
Test 7	7000	280	0.25	0.42
Test 8	7000	420	0.10	0.25
Test 9	7000	700	0.20	0.84

Table 5-6. Latin square design of slotting ($D10$)

	Spindle speed rpm	Feed mm/min	Axial depth of cut mm	MRR cc/min
Test 1	2250	200	0.1	0.20
Test 2	2250	300	0.2	0.60
Test 3	2250	500	0.5	2.5
Test 4	3150	200	0.2	0.40
Test 5	3150	300	0.5	1.5
Test 6	3150	500	0.1	0.50
Test 7	4500	200	0.5	1.0
Test 8	4500	300	0.1	0.30
Test 9	4500	500	0.2	1.0

水準をとった。各々の切削条件を表 5-4, 5-5, 5-6 に示す。これらの手法は工具メーカーが記載しているカタログ条件にも使われている可能性が高い⁵⁷⁾。その場合 2 回実験計画法を組んでいる可能性があるが、カタログ条件を水準の軸にして振り分けることにより、1 回目の水準設定より精巧な水準設定ができ、より最適な切削条件を得られる可能性があるものと考えられる。

さらに溝加工においては、側面加工の切削条件から S は 50-70%, F は 40-60% 下げて使用と範囲で記載されていることが多く、カタログ条件としては正確に記載されていないため、その範囲の中で最適条件を探索することは重要といえる。

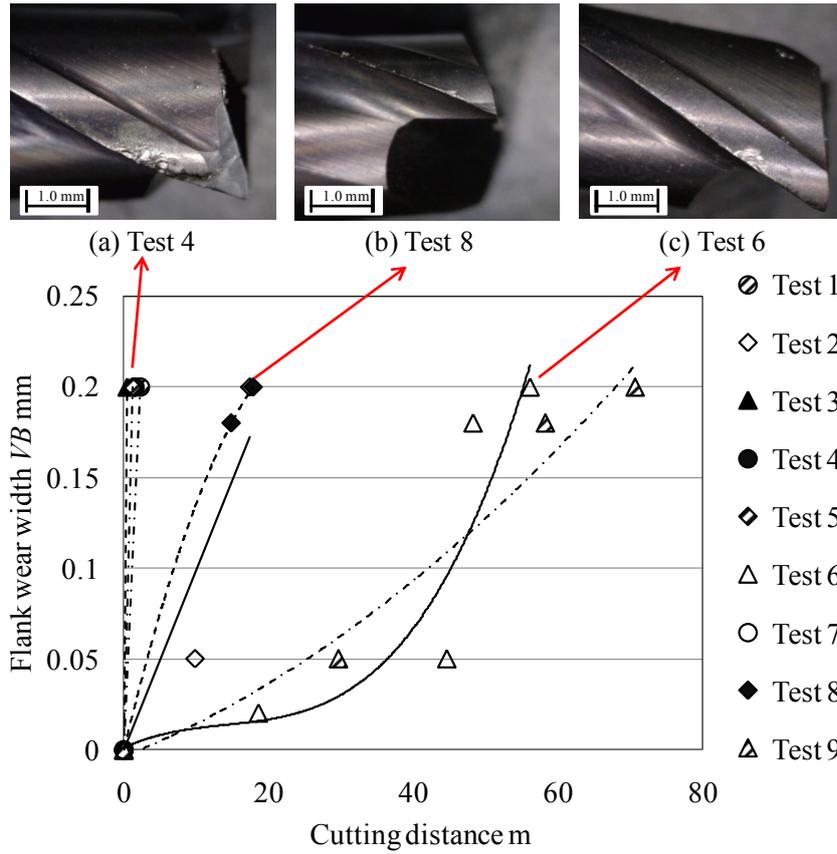


Fig. 5-4 Relationship between cutting distance and flank width in side-milling ($D6$)

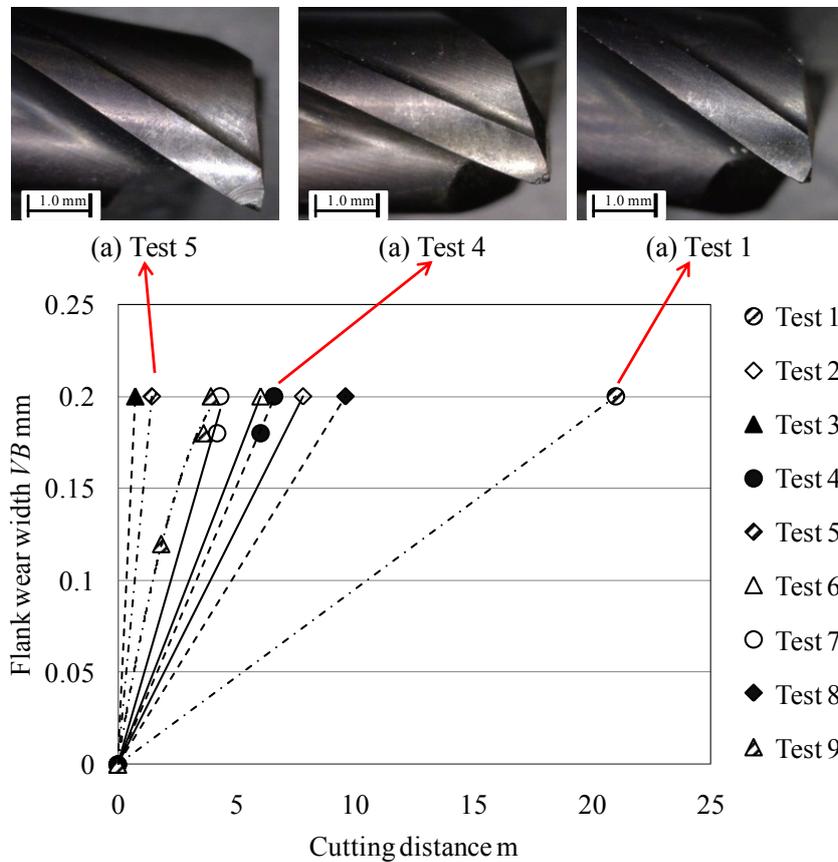


Fig. 5-5 Relationship between cutting distance and flank width in slotting ($D6$)

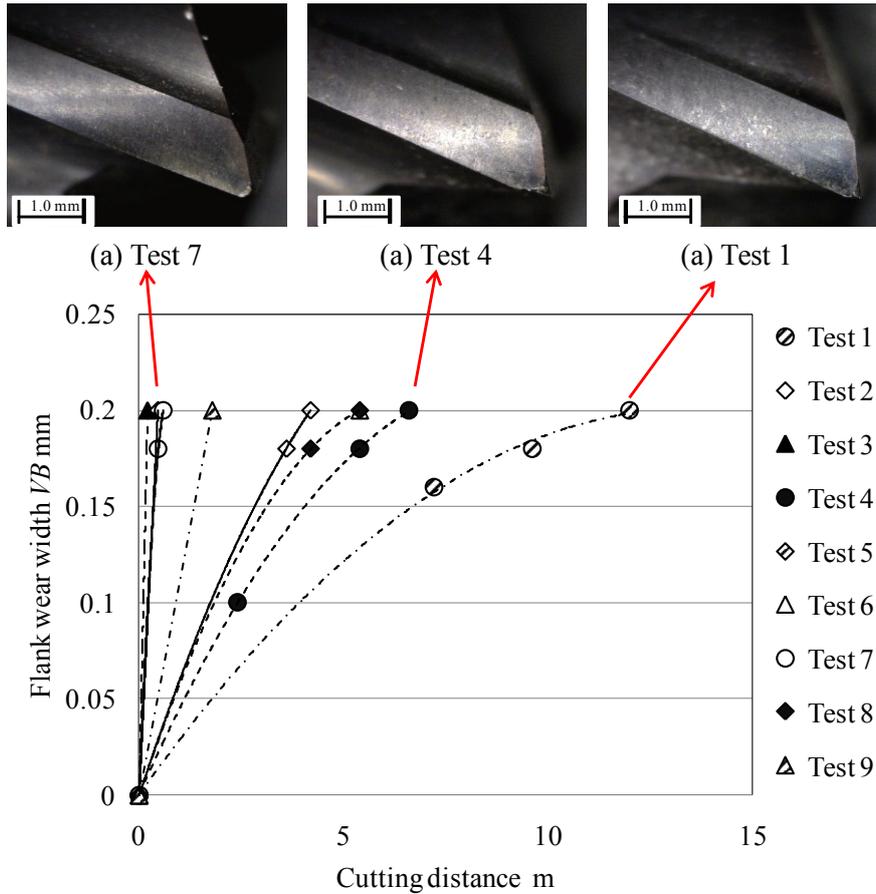


Fig. 5-6 Relationship between cutting distance and flank width in slotting ($D10$)

5-4. 工具寿命実験

表 5-4, 5-5, 5-6 の 3 加工で工具寿命実験を行った. ここでは逃げ面摩耗幅 $V_B=0.2\text{mm}$ を寿命の判断基準とし寿命距離 TL m を測定した⁵⁸⁾. 寿命距離と逃げ面摩耗幅 V_B との関係および 3 グループにわたった工具刃先の摩耗状態の 1 つの例を図 5-4, 5-5, 5-6 に示す. これらの図より, 側面加工は Ad が 2-6mm をとり, 溝加工は 0.1-0.5mm をとるため, 側面加工より溝加工の方が, 工具刃先が摩耗していることが確認でき, 全体的には被削材 SKD61 ($HRC53$) が硬材のため, 逃げ面摩耗幅 $V_B=0.2\text{mm}$ に達するより刃先のチップングが多く見られた. このようなチップングが見られた場合は, 逃げ面から垂直方向に 0.2mm 達した時を寿命と判断した.

まず, 側面加工では, Test 4 のような不安定な切削では工具刃先が大きく欠けてしまい, Test 8 では工具刃先のチップングが見られ, Test 6 のような安定した切削では逃げ面摩耗が生じていることが見られた. これは, エンドミル加工は断続切削であるため切削抵抗は切れ刃の数に応じて変動するが, 多刃でねじれ角を有するエンドミルの側面加工では切削抵抗が

Table 5-7. Results of tool life experiments under side-milling (D6)

	Cutting distance m	Longevity distance m	T_c
Test 1	7.40	2.20	3.30
Test 2	2.50	17.00	0.14
Test 3	0.99	0.50	2.00
Test 4	2.00	1.50	1.30
Test 5	2.50	1.20	2.00
Test 6	3.70	56.00	0.07
Test 7	1.20	1.20	1.00
Test 8	3.00	18.00	0.17
Test 9	5.00	71.00	0.07

Table 5-8. Results of tool life experiments under slotting (D6)

	Cutting distance m	Longevity distance m	T_c
Test 1	1.20	21.00	0.06
Test 2	0.60	7.80	0.08
Test 3	0.48	0.72	0.67
Test 4	0.60	6.60	0.09
Test 5	0.48	1.40	0.33
Test 6	1.20	6.00	0.20
Test 7	0.48	4.30	0.11
Test 8	1.20	9.60	0.13
Test 9	0.60	3.90	0.15

Table 5-9. Results of tool life experiments under slotting (D10)

	Cutting distance m	Longevity distance m	T_c
Test 1	1.20	12.00	0.10
Test 2	0.60	4.20	0.14
Test 3	0.24	0.20	1.20
Test 4	0.60	6.60	0.09
Test 5	0.24	0.48	0.50
Test 6	1.20	5.40	0.22
Test 7	0.24	0.60	0.40
Test 8	1.20	5.40	0.22
Test 9	0.60	1.80	0.33

一定に保たれることがある。この切削抵抗を一定値に保つことでチップング等の発生を抑えることができ、切削距離が長く安定した加工を行うことができる³⁴⁾。溝加工では、切削距離が長くなるにつれて、工具の先端が欠落する傾向にある。これは、安定した切削では工具の切れ刃と被削材が接触する長さである Ad のチップングが工具刃先に見られ、不安定な切削では、工具刃先にそれ以上の負荷が生じ、工具刃先から離れた位置まで拡散することで、 Ad 以上のチップングが見られることに起因する。また今回使用した工具は刃先を尖らせたピンカド形状である。特に溝加工において切り込み量が浅い場合、刃先に切削抵抗が集中するため、強度の低い刃先が欠落したことも原因のひとつと考えられる。

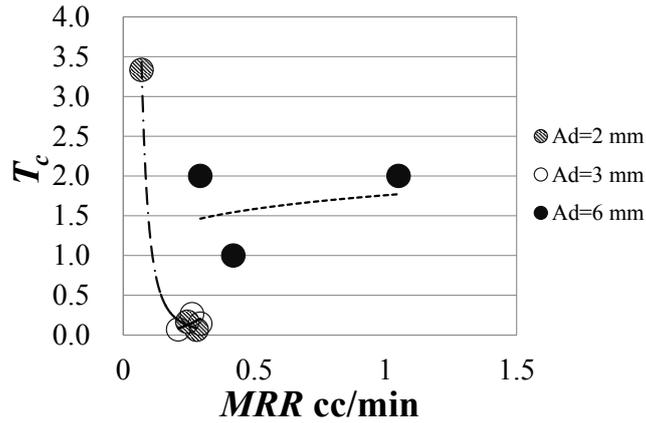


Fig. 5-7 Tool life coefficient under side-milling ($D6$)

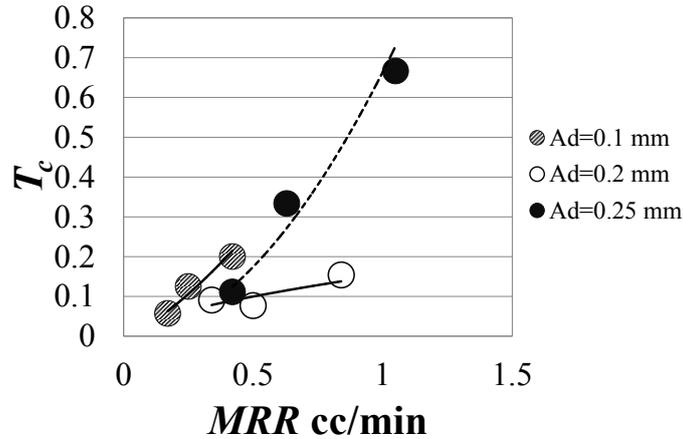


Fig. 5-8 Tool life coefficient under slotting ($D6$)

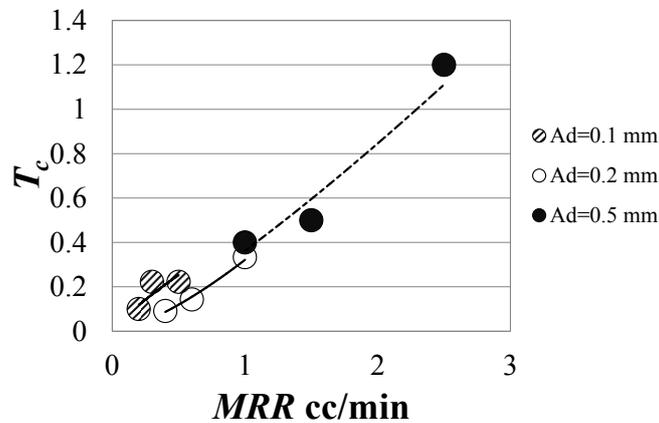


Fig. 5-9 Tool life coefficient under slotting ($D10$)

また、側面加工では MRR が小さい Test1, 8, 4 は寿命距離が上位 3 組中に 2 組は含むことから、 MRR を抑えて加工を行うと寿命距離が大きくなることが見られた。それに対して、 MRR が最大となる Test3 では、寿命距離が小さくなった。しかし、寿命距離が長くても、被削材の形状によって決まる切削距離が長くなれば、結果的に工具の摩耗が進展してしまう場合がある。そこで、 Ad , Rd により図 5-3 に示した形状から切削距離 TUT m を求めた。次に、

工具の寿命までに加工できる個数の逆数（被削材 1 個あたりの工具消耗量）を式(5-1) により求め、寿命係数 T_c とした。寿命係数 $T_c \leq 1$ ならば決められた形状のものを十分製造可能であり、 $T_c > 1$ ならば決められた形状のものを 1 本の工具で加工できないことを意味する。

$$T_c = \frac{TUT}{TL} \quad (5-1)$$

式(5-1)を用いた算出結果を表 5-7, 5-8, 5-9 に示す。次に横軸 MRR , 縦軸 T_c をとったグラフを図 5-7, 5-8, 5-9 に示す。これらの図から Ad が寿命距離に一番影響を与える因子であり、 Ad が大きい程、寿命係数が大きくなることがわかる。また MRR は切削条件から導出される値であり、実験を行わなくても T_c を予測できる可能性を示し後述で使用した。

工具寿命の研究は多く、工具のコーティング材と被削材の材質による化学反応⁵⁸⁾、切削抵抗や切削温度等の報告がある^{34) 40)}。また、ツールホルダの影響に関する報告もあり、ツールホルダの種類によって剛性が変化し、びびり振動を発生して工具の寿命に影響を及ぼすことがある^{59) 60)}。よって、表5-1から本実験で用いた工作機械はBT30に属するため、ツールホルダはBT30-NBS20-60（ユキワ精工製）を一貫して用いることでその剛性の変化による寿命の影響を抑えている。ここで、BTとはプルスタッドボルトを用いて工具に主軸を固定するタイプであり、ATC（Automatic Tools Changer）による工具の交換が可能な工具シャンク型式がMAS規格（日本工作機械工業会規格）によって定められている。

5-5. 切削時の消費電力測定実験

実験計画法で得られた 3 加工で図 5-3 に示した形状の被削材を切削した際の消費電力を測定した。ここでは、側面加工では 4 端各々切削条件を変えて実験を行った。同様に、溝加工では $D6\text{mm}$ と $D10\text{mm}$ を 3 条件ずつ変えて行った。また工作機械の消費電力計測器としてクランプ電力計（横河 M&C 株式会社 CW120）を使用した。本計器は電圧プローブ、電流クランププローブを用いて電圧、電流を測定し、実効値などで算出するタイプである。結線方式は三相 3 線であり、測定レンジは電圧 300V、電流 50A とした。測定場所は NC 工作機械の主電源部で行い、工作機械全体の消費電力をデータの表示更新周期 1 秒で測定した。加工後のワークを図 5-10 に示し、測定結果の例として $D6\text{mm}$ 側面加工 Test 5 の時間軸データを図 5-11 に示す。図 5-11 より加工中の消費電力を得るため、主軸回転開始時に消費電力が一瞬上昇する時間を始点とし、主軸回転終了時を終点とした図 5-12 に示すような近似を行っ

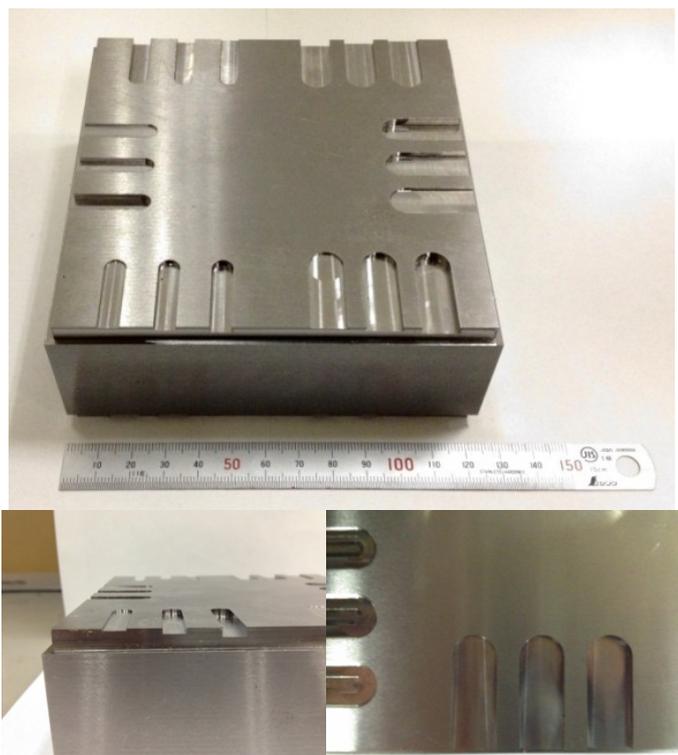


Fig. 5-10 Workpiece after power consumption measurement milling

た．また，実験ごとに油圧ポンプ作動のタイミングにとらわれないように油圧ポンプ ON/OFF の周期や平均消費電力を考慮して調整した．

次に各々の加工中の正味消費電力量 Wh を縦軸にとり， MRR を横軸にとったグラフを 3 加工各々図 5-13, 5-14, 5-15 に示す．これらの関係は指数関数的な減少を示した．油圧ポンプの平均消費電力は側面加工，溝加工といった加工方法やまたその切削条件に依存しないことから，消費電力は工作機械そのものの特性と考えられる．すなわち，消費電力量は切削時間によって決まる値である．また，切削抵抗の小さくなるエンドミルなどの加工では全体の消費エネルギーに占める切削の消費エネルギーは非常に小さく，同様の結果が得られている報告もある⁵⁶⁾．フェイスミル加工時では切削抵抗が大きく，切削の消費電力は全体の消費電力の 25%程度占める．今回使用したような切削抵抗が小さいエンドミルの加工では，その消費電力は全体の消費電力にはほとんど影響しないため，消費電力量を削減するためには， MRR を大きくし，切削時間を短縮することが効果的である．これは他に類似の報告でも見られる結果である⁽⁵⁰⁾⁽⁵¹⁾．しかし，本章のように，SKD61 のような高硬度材を切削する時は工具の消耗による環境負荷を考慮すると，環境負荷を低減するためには工具寿命を長くする切削条件の設定が重要であるとされている⁴⁰⁾．

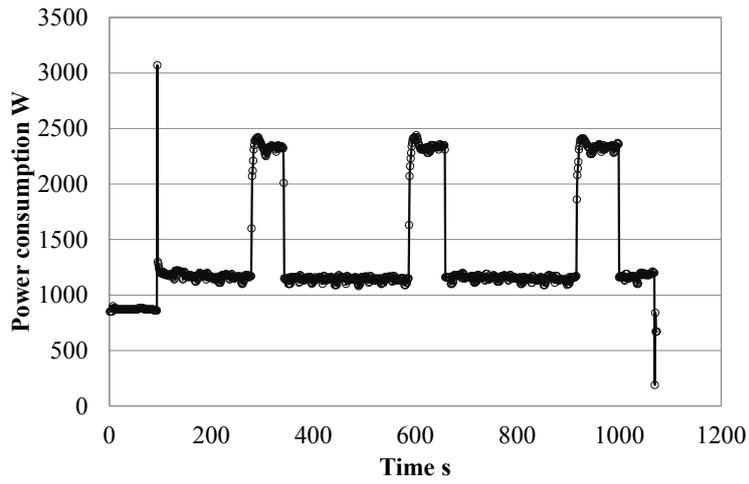


Fig. 5-11 Power consumption of test 5 under side-milling (*D6*)

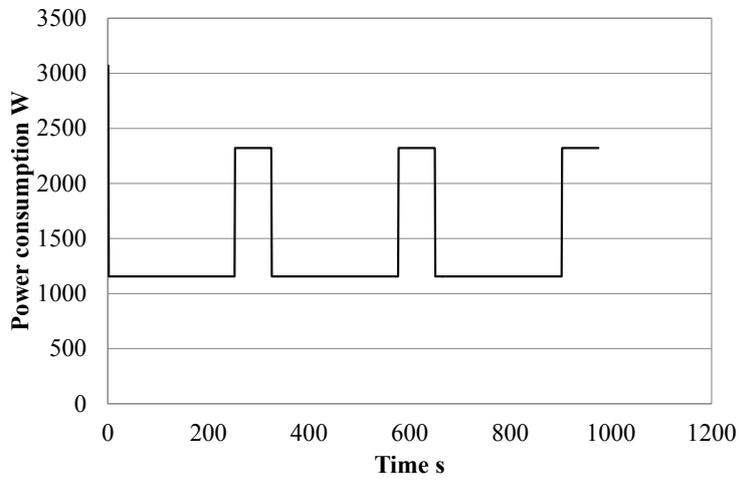


Fig. 5-12 Modulated power consumption of test 5 under side-milling (*D6*)

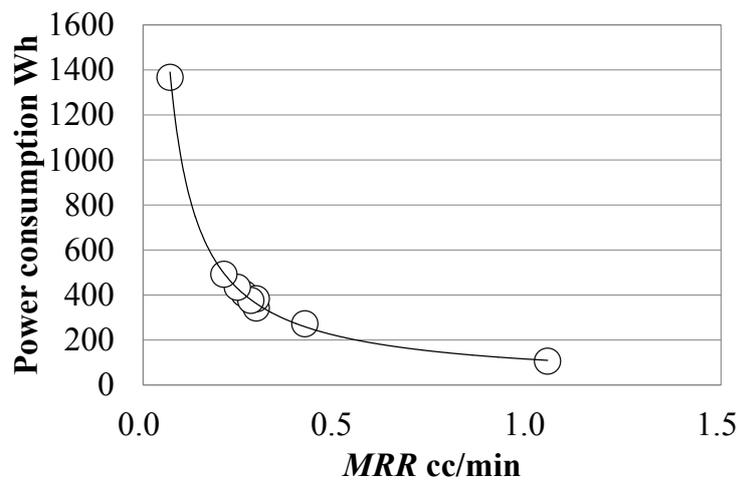
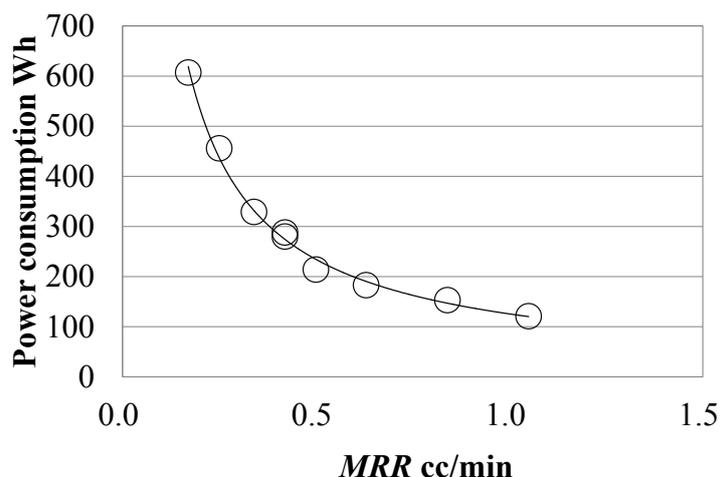
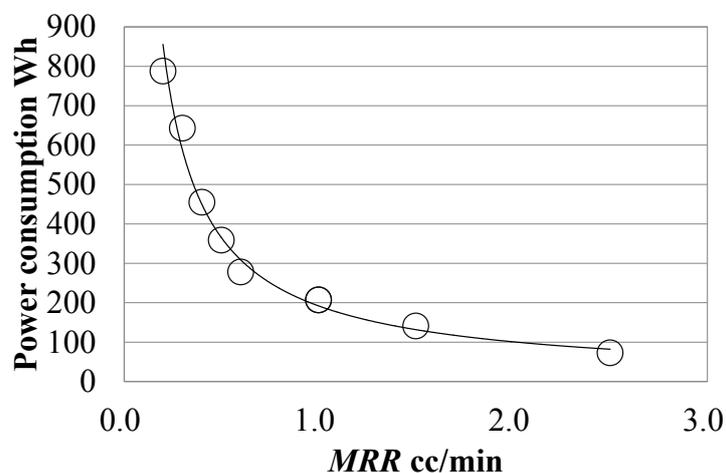


Fig. 5-13 Relationship between power consumption and *MRR* under side-milling (*D6*)

Fig. 5-13 Relationship between power consumption and *MRR* under slotting (*D6*)Fig. 5-13 Relationship between power consumption and *MRR* under side-milling (*D10*)

また、表 5-1 より今回使用した工作機械の正味質量は 3000kg であり工作機械では小型の部類に属する。今回、油圧ポンプ OFF 時の平均消費電力は 1200W となり、これより大型のマシニングセンタ、上述した日本工業標準仕様書 (TS) の手順で、消費電力を評価した報告では、例として、VK45 (立形 3 軸 MC) 正味質量 6300kg では消費電力 1620W, FH550S (横形 3 軸 MC) 正味質量 18000kg では消費電力 2741W となっており、2 倍程の消費電力になっている⁵⁶⁾。実際の加工時における消費電力を測定する際、各社の機械による加工能力が異なり、待機時に作動するものも異なるため、統一的な手順を示すことは難しいが、標準的な例として示される。また図 5-13, 5-14, 5-15 より、*MRR* と消費電力量には大きな相関がみられ、*MRR* は切削条件から導出される値であるため、実験を行わなくても図 5-13 を用いれば消費電力量を予測できるものと考え、以下で使用した。

5-6. 環境影響評価 (Life cycle assessment; LCA)

5-6-1. 概念

LCA とは対象とする製品を生み出す資源の採掘から素材製造，生産だけでなく製品の使用，廃棄段階まで，ライフサイクル全体，ゆりかごから墓場までを考慮し，資源消費量や排出物量を計算するとともに，その環境への影響を定量的に評価する手法である。

5-6-2. 評価指標

LCA は，目標の設定から始まり，インベントリ分析，インパクト評価という流れで行われる。まず，目標の設定とは，調査対象となる製品を決めることである。次に，インベントリ分析とは，対象とする製品の製造，使用，廃棄に係わるデータを収集し，環境負担項目に関する入出力明細表を作成することである。最後に，インパクト評価とはインベントリ分析により得られた結果から，通常 LCA では，地球温暖化やオゾン層破壊，人間への毒性影響等の環境影響項目が設定される。本章では環境影響項目の中でも，地球温暖化に着目する。その理由は，世界的にみても COP で議論されているように，環境負荷においては温室効果ガスによる地球温暖化，特に二酸化炭素排出量が注目されているためである。よって，地球温暖化に影響を及ぼす因子である CO₂（二酸化炭素），CH₄（メタン），N₂O（一酸化二窒素）の排出量を評価する。また，各因子の排出に起因する環境への影響割合を定量的に比較するため，特性化係数を乗じて，全ての排出量を CO₂ に換算し，合算して影響度の指標を求めた。特性化係数は表 5-10 に示すように，100 年間の影響度を示す地球温暖化指標（GWP）を用いる^{52) 53)}。

5-6-3. LCA フローおよび累積環境負荷計算結果

本章の LCA 評価の流れを図 5-14 に示す。累積環境負荷は工具 1 本の製造廃棄に関するデータと被削材 1 個を切削した際の消費電力量を，インベントリデータとして算出する。そして式(5-2)に基づき地球温暖化の観点から，3 加工による累積環境負荷を定量的に評価する^{52) 53)}。

$$B = T + E \quad (5-2)$$

ここで B kg-CO₂ は累積環境負荷， T kg-CO₂ は 工具の環境負荷， E kg-CO₂ は 工作機械要素の環境負荷である。

Table 5-10. Global warming characterization factors

	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
Global warming potential (GWP)	1	21	310

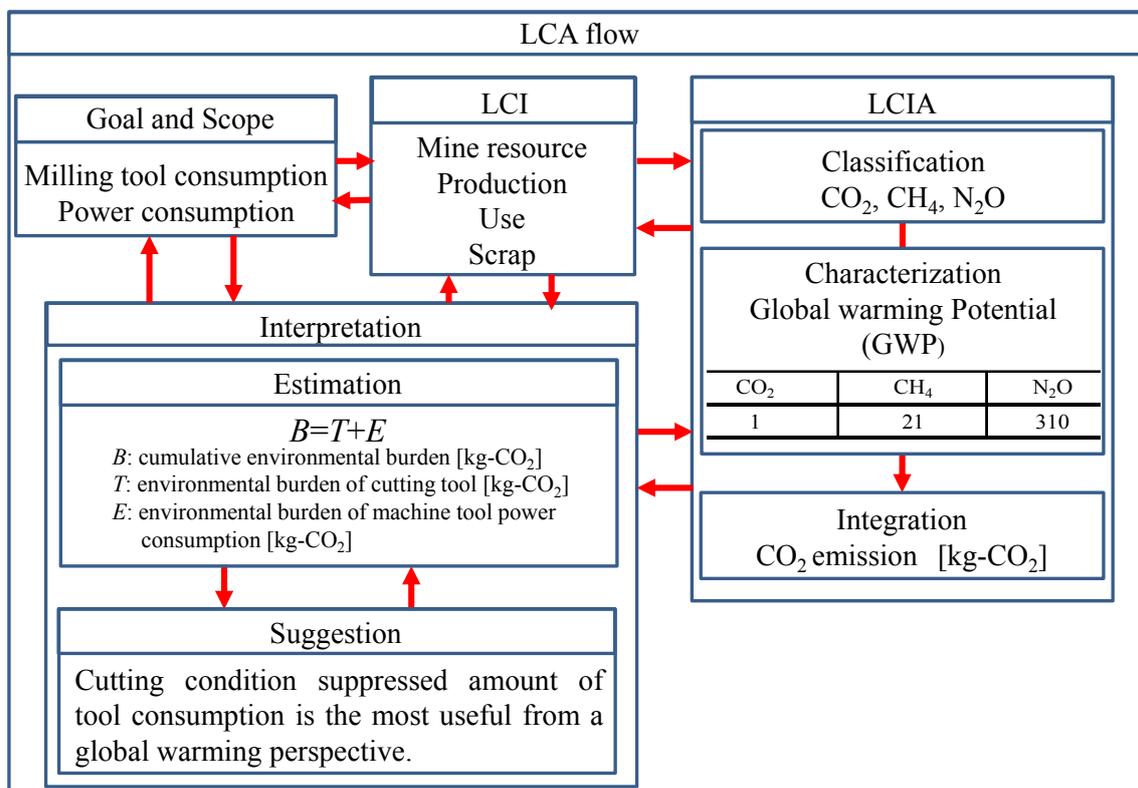


Fig. 5-14 LCA process flow

まず、工具 1 本の生産廃棄の環境負荷を考案する。工具の環境負荷は式(5-3)で表すことができる。

$$T = T_c \times (T_{Pe} + T_{De}) \times TW \times W \quad (5-3)$$

ここで T kg-CO₂ は工具の環境負荷、 T_c は寿命係数、 T_{Pe} kg-CO₂/kg は工具生産時の単位工具重量あたりの環境負荷、 T_{De} kg-CO₂/kg は工具廃棄時の単位工具重量あたりの環境負荷、 TW kg は工具重量、 W は被削材の個数である。式(5-3)の工具の生産、廃棄時の CO₂ 排出原単位は、企業の環境報告書や技術レポート等を参考にし、機械工具等の環境負荷原単位表の記載値を用いる⁶¹⁾。特に超硬工具は様々な素材から精製されるが、主な素材は WC 粉末であるため、ここでは超硬工具の素材は全て WC 粉末と仮定する。よって、CO₂ 排出原単位は工具

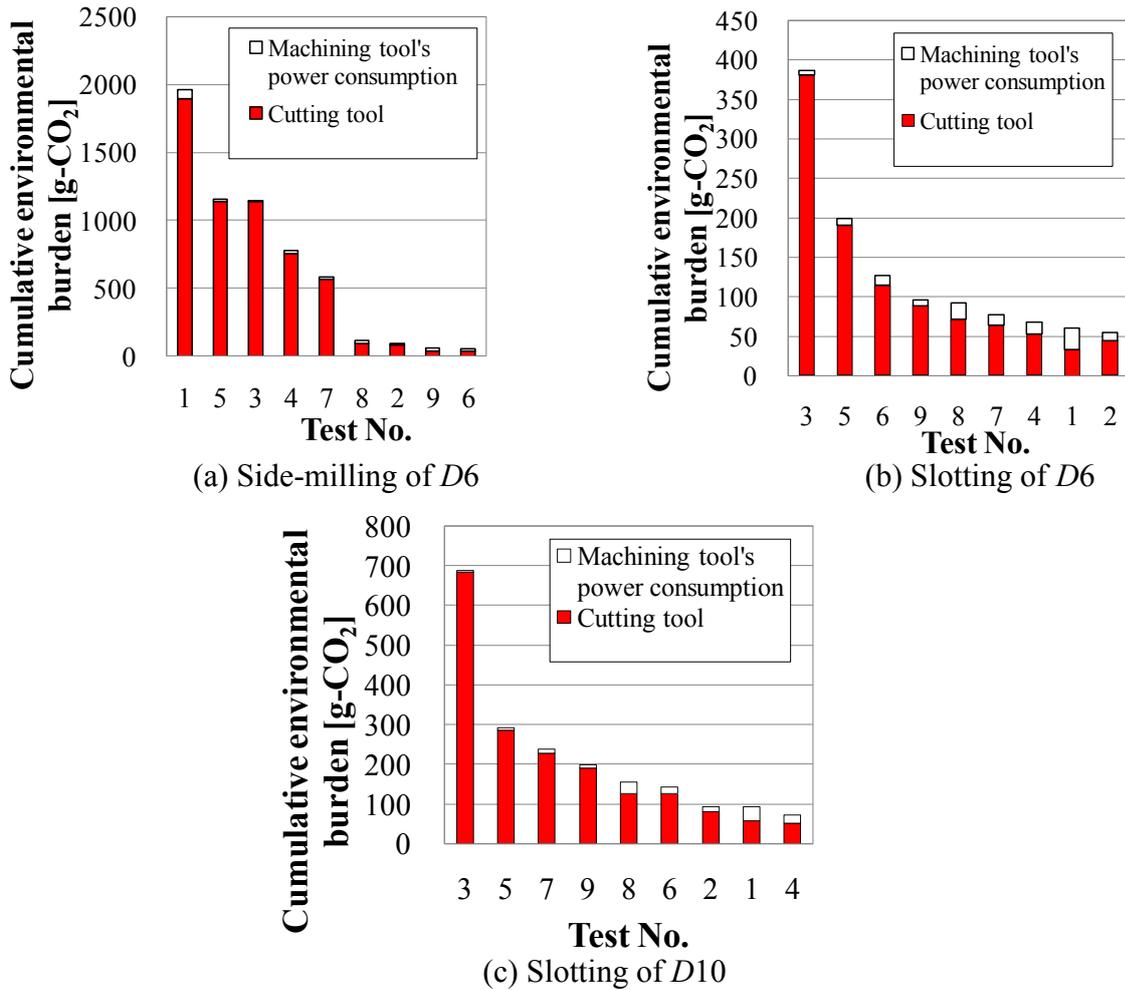


Fig. 5-15 Cumulative environmental burden

生産時の環境負荷 $TPe = 33.7\text{kg-CO}_2/\text{kg}$, 工具廃棄時の環境負荷 $TDe = 1.3 \times 10^{-2} \text{kg-CO}_2/\text{kg}$ を用い^{52) 53)}, 簡単のため, 被削材 1 個切削時を考慮し $W=1$ とする. また, 図 5-1 に示した使用工具重量各々 $TW=17\text{g}$, $TW=66\text{g}$ を考慮すると, 式(5-3)は式(5-4), 式(5-5)となった.

$$T = 0.57T_c \quad (D6\text{mm}) \quad (5-4)$$

$$T = 2.2T_c \quad (D10\text{mm}) \quad (5-5)$$

式(5-4), (5-5)に表 5-7, 5-8, 5-9 の寿命係数を代入することで工具の環境負荷 T を求めた. 工作機械要素の環境負荷 E は 5-4 節で得られた消費電力量をインベントリデータとし導出した. 最後に式(5-2)により合算することで累積環境負荷 B が得られた. 算出結果を図 5-15 に示す. これらの図より累積環境負荷は工具の環境負荷の割合が大きく占め, 累積環境負荷を抑えるには工具の環境負荷を抑えることが重要であることが示された. これはアルミ材等比

較的加工が容易な被削材では工具寿命を無視することは可能であるが、前述したようにSKD61ではむしろ工具寿命を考慮することが重要であるといえる⁴⁰⁾⁵⁰⁾⁵¹⁾。しかし、図5-15(b)のようにTest1は工具の環境負荷が最小となったが、工作機械要素の環境負荷を合算したことにより、累積環境負荷はTest2が最小となっている。同様に、図5-15(c)ではTest1とTest4の工具の環境負荷がほぼ同等となったが、工作機械要素の環境負荷を合算したことにより、累積環境負荷はTest4が最小となっている。これは環境負荷を抑えるためには工具寿命を考慮することは重要であるが、工具の環境負荷が低下すると、工作機械要素の環境負荷の影響度合いが増加するため、工作機械の消費電力量も考慮する必要があることがわかった。よって、式(5-2)のように工具、工作機械要素の環境負荷を合算する意義が示された。

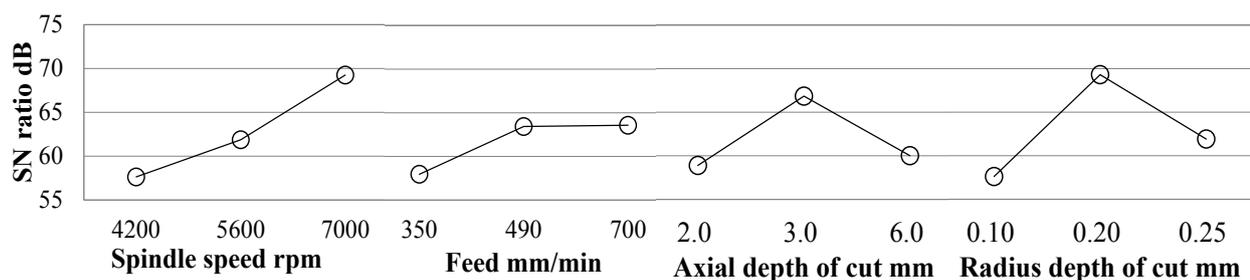
5-7. 最適切削条件の導出と各切削条件の影響評価の比較

図5-15より、データの散らばり程度を表す指標であるSN比を用い環境負荷を抑える最適切削条件 (Optimum condition) を求める。SN比には望大特性、望小特性、望目特性と3つの特性があり、ここでは累積環境負荷のように目標値が負でなく、小さい値をとることが望まれるものと定義する望小特性を用いた。望小特性の式は式(5-6)で表される。

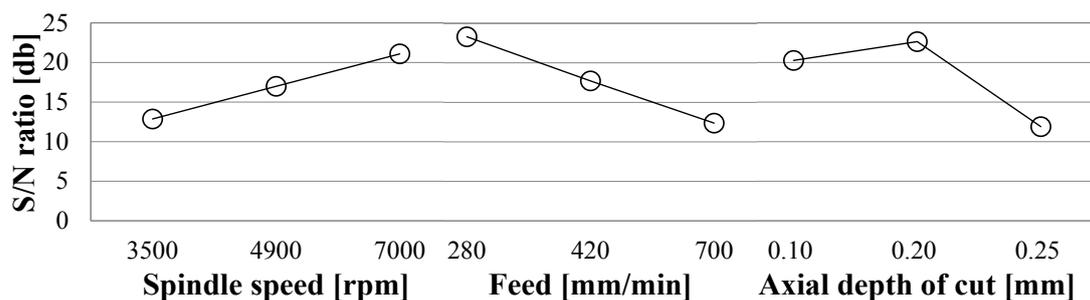
$$\eta_E = -10 \lg \left[\frac{1}{n} (D_1^2 + \dots + D_n^2) \right] \quad (5-6)$$

ここで、 η_E : 望小特性のSN比、 N : データ数、 D_i : データである。SN比算出結果を図5-16に示す。これらの図は要因効果図とよばれ、各々の因子からSN比が一番高くなった水準を選択し最適切削条件 (Optimum condition) とする。このような、直交表で水準因子を設定し、SN比を用いた要因効果図による最適条件の決定法は工作機械分野にも報告例がある^{59) 62)}。

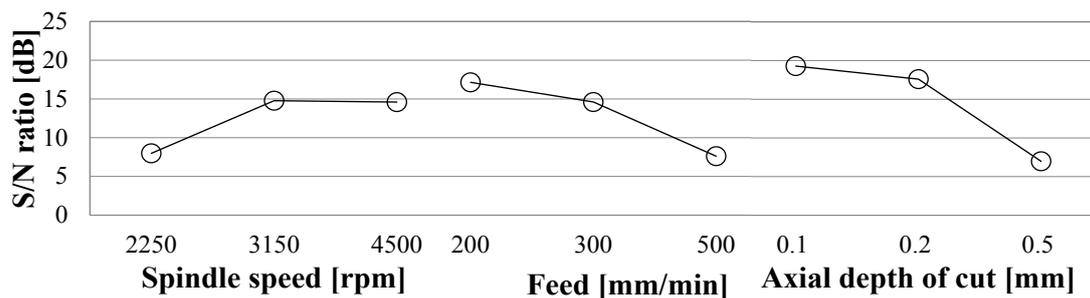
ここで、本章の目的であるマイニング条件の有効性を検証するため、マイニングによって得られた Mined condition, カタログメーカーが推奨する Catalog condition と Optimum condition の3切削条件を環境負荷の観点から比較し、有効性を評価する。3種類の切削条件をそれぞれ表5-11, 5-12, 5-13に示す。ただし、Catalog condition については、今回使用した工具では溝加工においては前述したとおり、側面加工の切削条件から S は50-70%, F は40-60% 下げて使用と記載されており、正確な条件が得られなかったため、マイニング条件と最適条件の2つの条件で比較を行った。3種類の切削条件による累積環境負荷のうち、工具の環境負荷は図5-7, 5-8, 5-9より MRR から寿命係数を予測することで求めた。同様に、工作機械要素の環境負荷は図5-13, 5-14, 5-15より MRR から消費電力量を予測することで求めた。3



(a) D6 side-milling



(b) D6 slotting



(c) D10 slotting

Fig. 5-16 S/N ratios

種類の切削条件による、累積環境負荷および累積環境負荷に対する工具の環境負荷と、工作機械要素の環境負荷の影響の割合を図 5-17 に示す。まず、D6mm 側面加工における累積環境負荷では、最適条件はカタログ条件の 31%となり、マイニング条件の 27%となった。D6 mm 溝加工における累積環境負荷では、最適条件はマイニング条件の 50%となった。D10mm 溝加工における累積環境負荷では、最適条件はマイニング条件の 6%となった。これより、最適条件は環境負荷を最も抑えることができる切削条件であることが確認できた。本章ではマイニング条件は、D6mm 側面加工において最も累積環境負荷が大きくなり、D6mm、D10 mm 溝加工においても最適切削条件と比較して大幅に大きいため、マイニング条件を用いることの有効性を示すことは難しいといえる。最適条件とは実験計画法を用いて、環境負荷が

Table 5-11. End-milling conditions for *D6* side-milling

	Catalog conditions	Mined conditions	Optimum conditions
Spindle speed rpm	7000	7870	7000
Table feed mm/min	700	822	700
Cutting speed m/min	132	148	132
Feed rate mm/tooth	0.05	0.05	0.05
Axial depth of cut mm	6.0	6.0	3.0
Radius depth of cut mm	0.3	0.5	0.2
<i>MRR</i> cc/min	1.1	2.5	0.4

Table 5-12. End-milling conditions for *D6* slotting

	Mined conditions	Optimum conditions
Spindle speed rpm	3352	7000
Table feed mm/min	637	280
Cutting speed m/min	63	132
Feed rate mm/tooth	0.03	0.02
Axial depth of cut mm	0.10	0.20
<i>MRR</i> cc/min	0.38	0.34

Table 5-13. End-milling conditions for *D10* slotting

	Mined conditions	Optimum conditions
Spindle speed rpm	6652	3150
Table feed mm/min	500	200
Cutting speed m/min	209	99
Feed rate mm/tooth	0.04	0.03
Axial depth of cut mm	1.40	0.10
<i>MRR</i> cc/min	7.02	0.20

最小となるように求めたものであり、マイニング条件はそのような観点から決定されていないためである。しかしながら、最適条件は試行錯誤的に実験を繰り返して導かれた条件であり、時間や工具、電力を消費してしまう。これらを考慮すると、マイニング条件を初期段階で用いることでの優位性はある。

5-7-1. 習熟曲線を適用した環境負荷指標モデル

ここで、試行錯誤的な切削量（切削回数）の削減効果を定量化するために、図 5-18 に示すような技術習熟過程における環境負荷指標モデルを考案し、前節で述べたマイニング条件の有効性を示す。図 5-18 は習熟曲線理論をもとに考案したモデル図である。習熟曲線とは生産量、すなわち加工経験を増加させることで習熟度が増すことで、単位当たり加工時間は

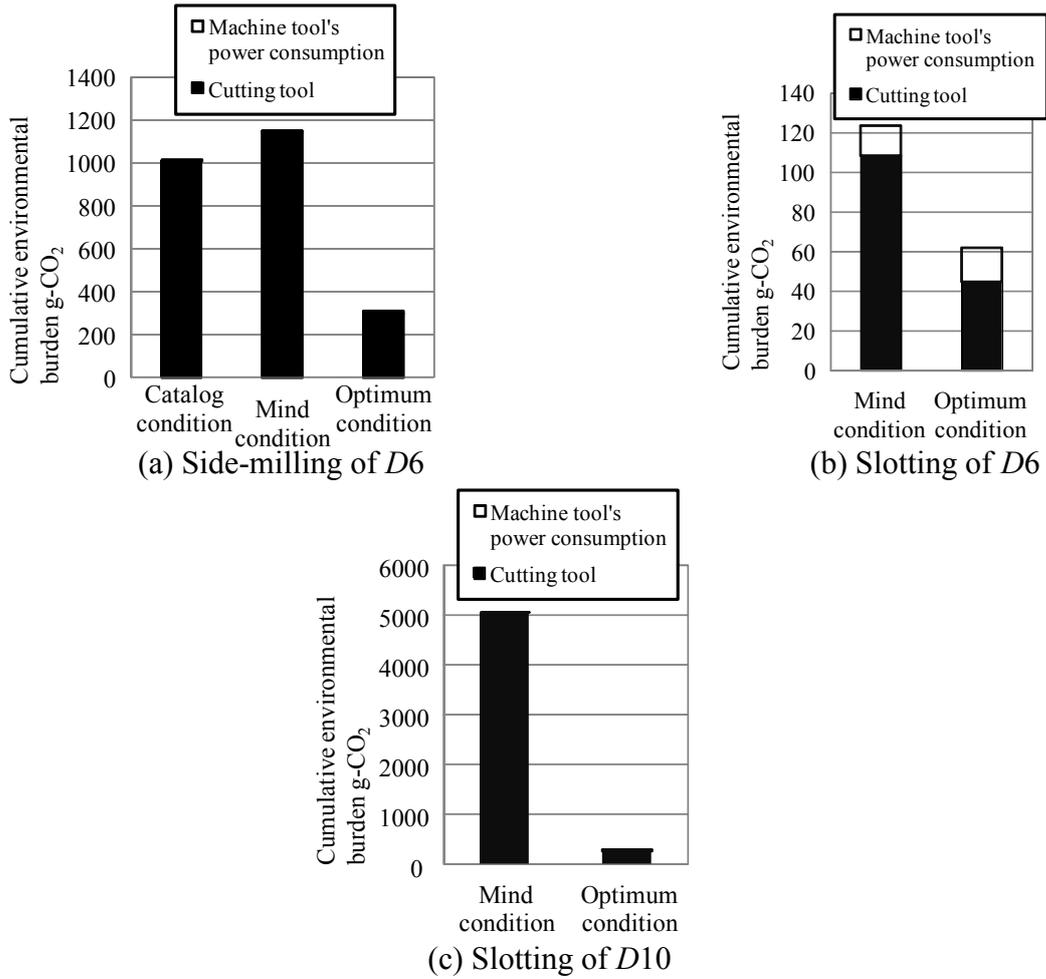


Fig. 5-17 Cumulative environmental burden for each set of conditions

Table 5-14. Tool and power consumption in experimental design

	Tools	Power consumption Wh	Cumulative environmental burden g-CO ₂
Tool life experiment	9	3080	5272
Power consumption measurement	2	2631	1261
Sum	11	5711	6533

一定の比率で減少していくという実務によくあてはまる曲線である⁶³⁾。この理論のもと提案する習熟曲線は図 5-18 に示し、式(5-7)で定義する。

$$y(x) = Ix^{n(p)} \tag{5-7}$$

ここに、 x :切削回数、 $y(x)$:切削回数 x 回目の指標結果、 I :切削回数 1 回目の指標結果である。また、習熟係数 $n(p)$ は習熟率 p から与えられる係数であり、式(5-8)に示す。

$$n(p) = \log p / \log 2 \tag{5-8}$$

習熟係数 $n(p)$ が大きいほど習熟効果は大きくなる。この習熟曲線の理論をもとに、D6mm 溝

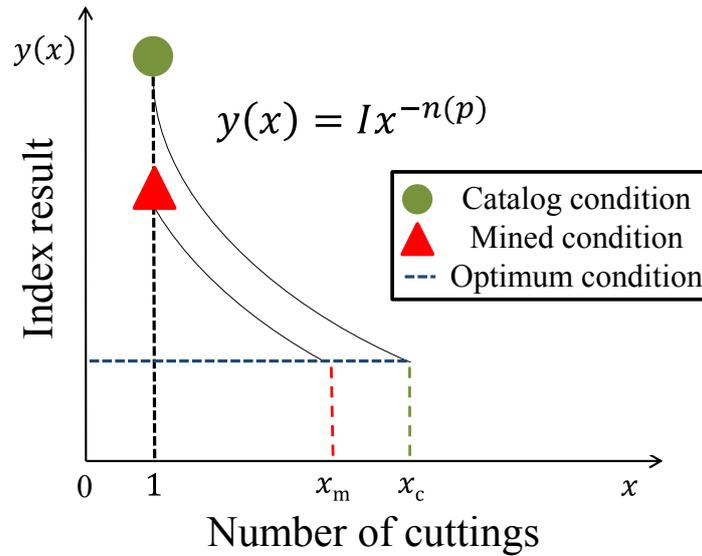


Fig. 5-18 Learning curve prediction model

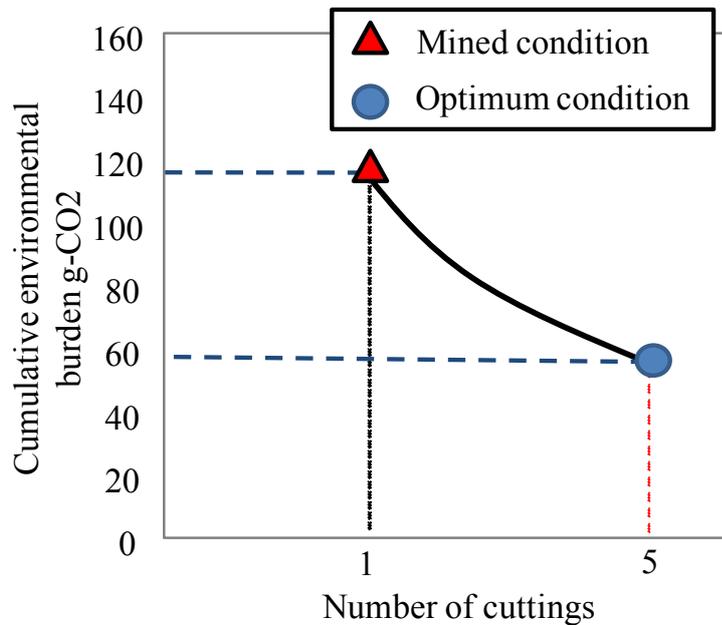


Fig. 5-19 Learning curve prediction model of D6 under side-milling

加工における習熟モデルを構築し図 5-19 に示す。図 5-19 より縦軸の指標には累積環境負荷をとり、横軸は実験回数を表す。また習熟係数 $n(p)$ はここでは図 5-15 から算出し 88% となった。この場合、習熟係数 $n(p)$ は高いため習熟効果が大きいと考えられる。すなわち、習熟係数の観点から最適な切削条件を得ることは、易しいということがわかった。また、横軸の回数より、マイニング条件から最適条件を得るには、最低でも 5 回の切削回数が必要であることが予測でき、この期間では累積環境負荷で 474 g-CO₂ ほど消費することが予測される。さらに、このような最適条件を実験計画法により導くと仮定すると、9 回の工具寿命を求め

る切削実験と 9 回の消費電力測定実験の、合計 18 回の実験を遂行する必要がある。これらの実験で消費される累積環境負荷は 6533 g-CO₂ であり、これはマイニング条件で 18 個の被削材（3 つの溝加工によって 54 個）を消費することに相当する。実験計画法で消費した工具、消費電力量および累積環境負荷を表 5-14 にまとめる。図 5-19 および表 5-14 を考慮すると、初期段階にマイニング条件を使用することにより、試行錯誤期間での時間、工具、電力や被削材の消費を削減することができる。特に、実験計画法のような実験を行わないで迅速に切削条件を得る必要がある場合は、マイニング条件を初期段階で用いる有効性が高いことが考えられる。さらにカタログには正確に切削条件が記載されていない溝加工においては、マイニング条件を用いることで明確な切削条件を得ることができるという利点もある。

5-8. 結言

カタログマイニングによって導出された切削条件決定式の特徴を考察するため、工具寿命実験、消費電力測定実験を行い、その実験結果から環境への影響を定量的に評価する手法である LCA を用い、本システムの環境負荷の低減に対する有効性を検討した。従来は考慮されることのなかった工具の消耗に起因する環境負荷も考えることで、以下の結果が得られた。

- (1) 累積環境負荷の低減を目的とした最適条件を実験計画法を用いた実験により導くことができた。
- (2) 切削効率 MRR が大きくなるほど寿命係数 T_c は大きくなり、消費電力量は小さくなった。
- (3) 累積環境負荷を抑えるには工具に起因する環境負荷を抑えることが重要であり、加えて工作機械の消費電力量も考慮する必要があることがわかった。
- (4) 習熟曲線を用いることにより、提案したマイニングシステムは初期段階の試行錯誤的な切削の時間や工具、電力消費を削減することができる有効性が示された。
- (5) カタログには正確に切削条件が記載されていない溝加工においても、マイニング条件を用いることで一義的に切削条件を得ることができることもわかった。

第 6 章 難削材料加工用の切削条件決定支援システムの提案

前章において、金型鋼を対象に、カタログが推奨する切削条件 (Catalog condition)、マイニングによって得られた切削条件 (Mined condition)、実験計画法を用い得られた最適切削条件 (Optimum condition) の 3 つの切削条件を用いて切削実験を行った。測定された工作機械消費電力量をもとに LCA を行うことにより、マイニング条件を加工の初期段階で用いることの有用性を習熟度曲線の観点から検証した。本章⁶⁴⁾⁻⁶⁶⁾では、これまでに提案してきたカタログマイニングの手法を、超耐熱合金などの難削材料と呼ばれる、比較的切削条件が低く低能率な加工が遂行されている場合について、難削材加工用の切削条件決定支援システムを提案し、その有用性を切削実験によって検証した。

6-1. 緒言

近年、機械加工の短納期化や加工物の複雑形状化の要求により、さらなる高速、高能率、高精度加工が求められている。しかしながら、日本において近年の新たな産業分野である航空機業界で多用されているニッケル基超耐熱合金やチタン合金、オーステナイト系ステンレス、CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastics) といった複合素材などに代表される「難削材料」の加工においては、鋼を切削する際に一般的であった従来の加工法や切削条件が適さない場合がある。一般的に、難削材の特性として、材料の低熱伝導性、高い加工硬化性、構成刃先の形成、工具材種との親和性等があげられる。山根らは図 6-1 に示すように、難削材料の被削性を構造用炭素鋼である S45C と比較して、切削抵抗や工具摩耗、切削温度、切りくず処理性の観点から理論的にかつ実験的に定量化し、難削指数としてレーダーチャートにまとめることによって、各難削材の加工の難しさをビジュアル化している⁶⁷⁾。これらの難削材料は構造用の炭素鋼と比較して一般的に、高い重量比強度や高耐食性、耐熱性、低熱伝導率などの材料特性を有している。これらの材料特性は結果的に、切削工具刃部の非定常摩耗の進行や、切りくず生成に起因した自励的なびびり振動を引き起こす。そのため、工具寿命の低下を招いてしまうため高能率な加工が可能である切削条件の導出が困難である。

これまでに、上記の難削材料を対象とした、高速切削技術の開発に関する研究⁶⁸⁾⁻⁷⁰⁾や、摩耗プロセスの解明⁷¹⁾⁻⁷³⁾、難削材料加工用に特化した切削工具刃部のコーティング技術の開発および工具形状の開発⁷⁴⁾など多岐にわたる研究成果が発表されてきた。さらにそれら

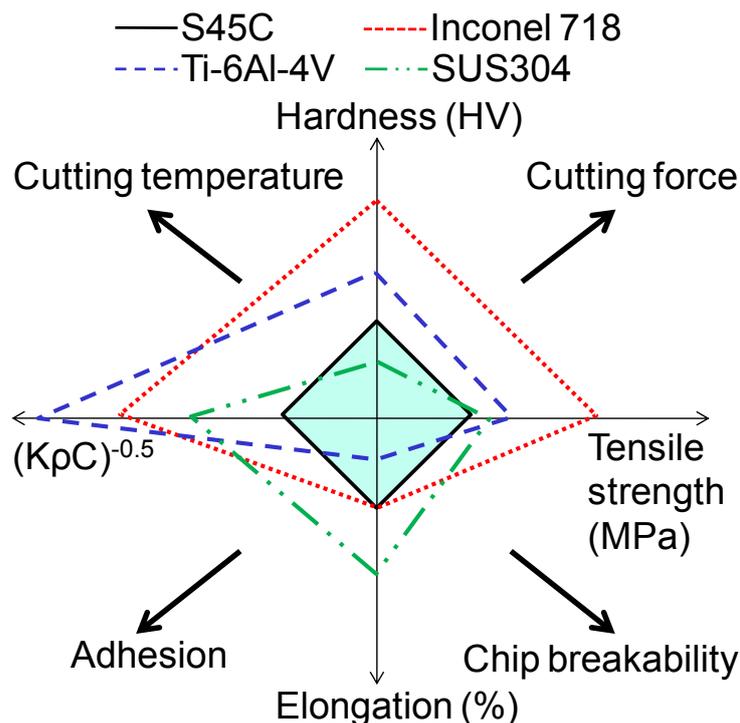


Fig. 6-1 Cobweb chart of Difficult-to-cut ratio

に特化した工具カタログも出現してきた。すなわち、多くの切削工具メーカーは、それらの現象を踏まえた難削材加工用エンドミルとして、専用コーティングの開発や、刃先に不等リード、不等ピッチの構造を施した難削材の加工に特化したエンドミルを開発してきた。上記の工具では、各刃の切削の間隔を不等にすることで自励的なびびり振動を効果的に抑制することが可能であり、結果的には高能率・高寿命な切削が実現できる。工具形状に関しては各メーカーで同様な設計がなされてはいるが、各メーカーのカタログにおいて加工能率やそれに起因するコスト、納期を左右する切削条件の決定に関しては各メーカーで異なっており、明確な指針が示されていないのが現状である。そのため、難削材加工用の最適な切削条件決定支援システムを構築することが必要であると考えられる。

そこで本章では、難削材用工具カタログに非階層・階層型クラスタリング手法を併用したカタログマイニングシステムを適用することで、難削材加工用の切削条件決定支援システムを構築し、その有用性を切削実験により検証した⁶⁶⁾。また、提案する難削材材料加工用の切削条件決定支援システムに関して、新たに不等リード・ピッチエンドミルの刃部の幾何学的な形状に注目した新しいクラスタリングシステムを提案することによって、さらに新たに2次の応答曲面を用いて指針となる切削条件（切削速度）を定量的に提示した⁶⁴⁾⁶⁵⁾。

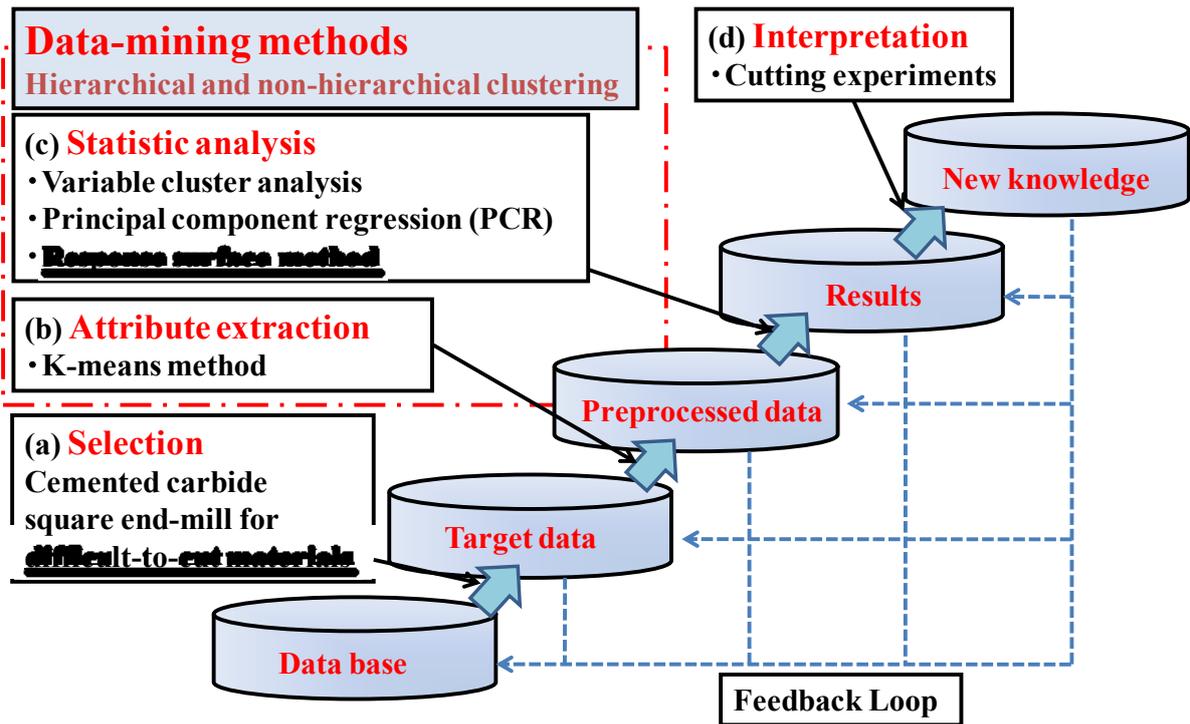


Fig. 6-2 Catalog mining process proposed in this chapter

6-2. カタログマイニングプロセス

今回提案する難削材加工用切削条件決定支援システムのカタログマイニングプロセスを図 6-2 に示す。工具カタログから難削材を対象として、データベースを構築し、そこからターゲットデータとして、超硬スクエアエンドミルを採用した。採用されたエンドミルのデータ群に対して、K-means 法を適用することにより、工具形状の観点から 5 つのクラスタに分類した。分類された各クラスタから、さらに側面加工用、溝加工用の切削条件に分類することによって属性抽出を行った。分類された各属性に対して、変数クラスタ分析および、主成分回帰の手法を適用することにより、切削条件の予測に有意となる説明変数を選択した。

ここで前章までは重回帰分析手法により、有意となる説明変数からスクエアエンドミルの切削条件 (Mined condition) を予測し、実験的に切削条件の有用性や環境影響評価を行ってきた。しかしながら、切削速度 V やテーブル送り速度 F に代表される速度成分因子は、工具形状や被削材硬さなどの説明変数に対して非線形な関係を有していた。そのためこれらの速度成分因子の場合、重回帰分析式によって導出された 1 次までの説明変数項で構成される切削条件式の精度を表す決定係数は、一般的に予測精度として有意であるといわれている 0.5 に及ばず、残差の分布も予測精度の高い条件式に比べて相対的に大きい結果であった。そこで本章では、図 6-2 に示す各プロセスを構成する要素の中で、(c)統計解析において 1 次

の重回帰分析ではなく、切削条件決定式の導出に新たに3変数2次の応答曲面式を採用することにする。その結果、目的変数が速度因子成分の場合でも、1次変数では相関がなくとも2次、または他の説明変数を組み合わせた多項式にすることによって寄与度が増し、導出される条件式の精度が向上するものと考えられる。

6-3. ターゲットデータ

データベースとして、工具カタログに記載されている、難削材料の粗加工用超合金製エンドミルを選択した。ターゲットデータとして、国内大手A社2011-2012年度版の工具カタログから超合金製スクエアエンドミルを選択した。カタログに切削条件が記されているデータ（総数は825項に及ぶ、工具径で0.1mm～25mm）をデータベースとした。4章まで、金型加工用の超硬エンドミルを対象としてきたが、難削材加工用エンドミルのターゲットデータ数はそれに比べて少ない傾向であった。スクエアエンドミルの工具形状モデルは4章の図4-2に示すものと同様である。4章までと同様に、工具カタログに記載されている外径 D mm、刃長 l mm、全長 L mm、シャンク径 D_s mm、刃数 z 、ねじれ角 θ degreeなどの形状データを説明変数とした。また、被削材の種類としてロックウェル硬さHRC35, 40, 45のオーステナイト系ステンレス鋼（JIS SUS304 and SUS316）、チタン合金（Ti-6Al-4V）、Ni基超耐熱合金（Inconel718）を対象とし、同様にその硬さHRCを説明変数として加えた。ターゲットデータに対して、各被削材料が占める割合はそれぞれ、40%、43%、17%であった。目的変数は、重要な加工条件因子である切削速度 V m/min、一刃当りの送り（以後送り量と称す） f mm/tooth、軸方向切込み量 A_d mm、側面加工では径方向切込み量 R_d mmも目的変数とした。切削速度 V は $V = \pi D S / 1000$ 、送り量 f は $f = F / (S \cdot z)$ を満たす。ここで S rpmは主軸回転数、 F mm/minはテーブル送り速度であり、工具カタログに各難削材および工具外径ごとに推奨値が記載されている。

6-4. カタログマイニング結果および考察

6-4-1. 工具形状によるモデル化とクラスタリング

4章までと同様に、クラスタ数を5つとして、スクエアエンドミルを工具形状比(L/l , l/De , D_s/De)によりクラスタ分けした結果および各クラスタのデータ数、各係数の平均値を図6-3に示す。 L/l および D_s/De が増大するにともなって、工具外径は小径化していく。また l/De の低下にともなって、エンドミルの刃数は減少していく。クラスタ1, 2および3を構成す

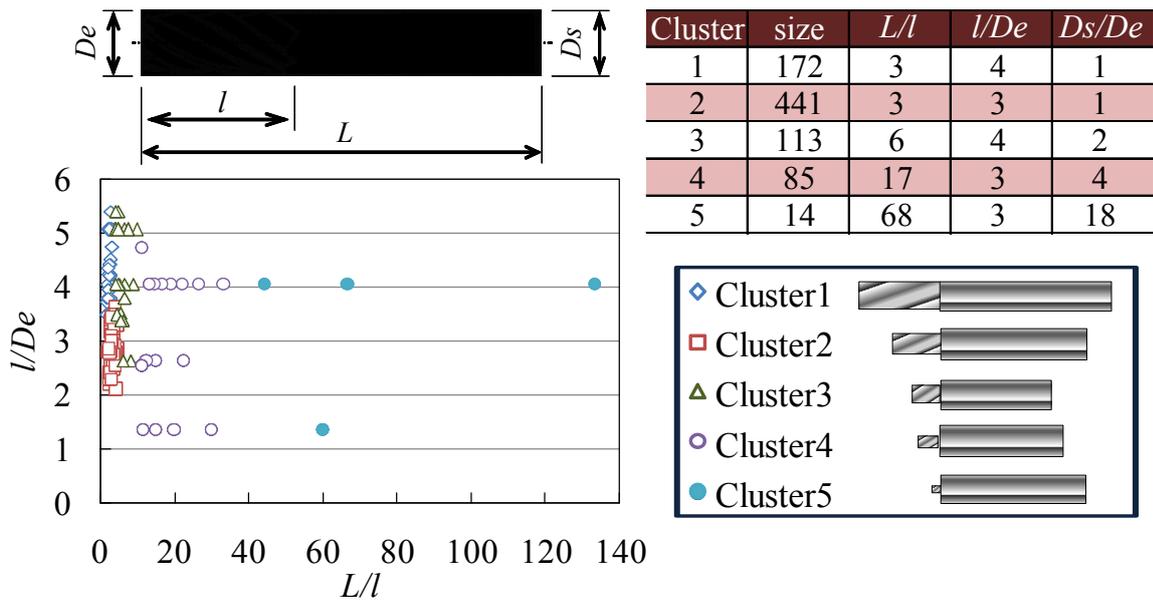


Fig. 6-3 Results of K-means method

ほとんどの工具は、 D と D_s の比が 1 の段付きのない工具である。クラスタ 2 はすべてのクラスタのなかで一番データ数が多く、クラスタ 1 や 3 に比べて、刃数 z の多い高速切削加工に適した工具や様々な種類の被削材料の切削に対応した汎用エンドミルが多く含まれている。クラスタ 4 および 5 は工具径 D が 1.0mm 以下の小径エンドミル (L/l 大, D_s/De 大) によって構成されている。A 社工具カタログにおいて、推奨切削条件は側面加工と溝加工によって分類されている。そのため、4 章までと同様に、各クラスタにおいて、側面加工用および溝加工用エンドミルとして用途別にさらにデータを 2 分化する。その結果、合計で 8 つの属性を抽出することができる。

6-4-2. 切削条件決定に有意となる説明変数の選択

4 章までと同様に、各クラスタにおいて抽出された各属性に対して、変数クラスタ分析および主成分回帰により、目的変数（工具カタログが推奨する難削材料加工用の切削条件）と相関関係のある説明変数（工具形状パラメータおよび被削材硬さ）を 3 つ選択する。

4 章では近年の傾向として代表的である高速切削が可能な、多刃、強ねじれかつ刃先剛性の高いラジアスエンドミルを多く含むクラスタに注目して、統計解析手法を適用し、切削条件決定式を導出した。本章においても同様に、それらの工具を多く含み、かつ比較的安価で汎用的なエンドミルが含まれるクラスタ 2 に注目して、2 次の応答曲面による切削条件決定式

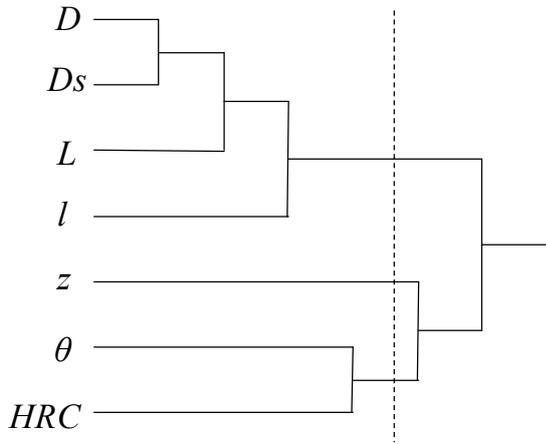


Fig. 6-4 Dendrogram of Cluster 2 for side milling.

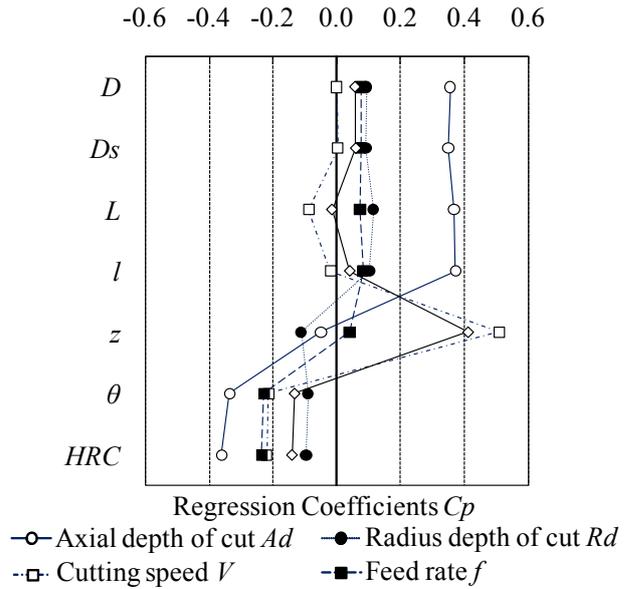


Fig. 6-5 Calculation result of PCR

を導出していく．クラスタ2の側面加工用のデータに対して，階層型クラスタリング手法である変数クラスタ分析と主成分回帰を行った結果を図6-4，図6-5に示す．

図6-4よりA社のクラスタ2，側面加工の場合，工具寸法形状を表す説明変数 (D と D_s , L , l) と刃先形状と被削材硬さの説明変数 (θ と HRC) と z の3つの階層クラスタに分けられる．クラスタ2は段付きのない工具形状のスクエアエンドミルによって構成されているため， D と D_s は同値であり，相関関係は強い．また z が単体でひとつのクラスタを形成していることから，他の変数に対して独立していることがわかる．図6-5について，上述したそれぞれ3つの階層クラスタに含まれる説明変数のなかで，切削速度 V は z と正の相関関係(C_p , 0.45)を有しており， θ と HRC に対しては負の相関関係(C_p , -0.22)を有している．軸方向切り込み量 Ad が工具寸法を表す説明変数 (D と D_s , L , l) と正の相関関係(C_p , 0.38)および θ と HRC と負の相関関係(C_p , -0.35)を有している一方で，径方向切り込み量 Rd は，すべての説明変数に対しての相関関係が低いことがわかる．4章と同様にして，これらの図をもとに，切削条件決定に有意となる説明変数を選択していく．

6-4-3. 切削条件決定式の導出

前節の手法で選択された有意変数を用いて，実用的な最適化手法である応答曲面法により，3変数2次の切削条件決定式を導出する．影山ら⁷⁵⁾は，多峰性問題解決のため，設計変数，特性値の集合を設計変数の形状で階層的クラスタリングし，クラスタリングされた階層ごと

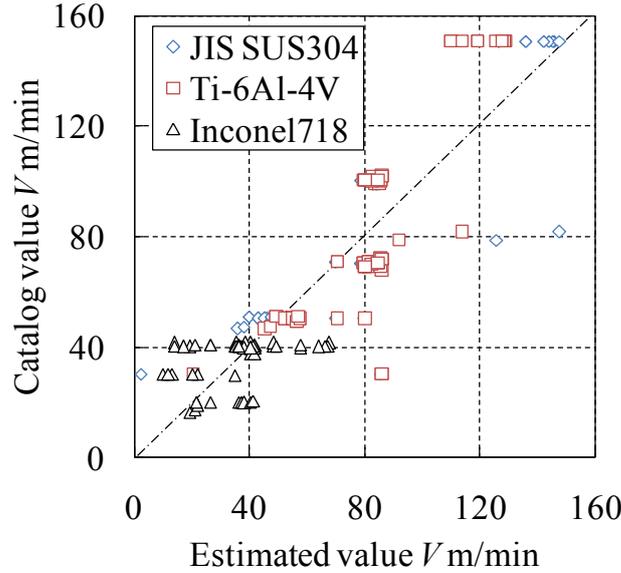


Fig. 6-6 Relationship between catalog and estimated value (Cluster 2, Side-milling)

に応答曲面近似式を導出する手法として階層的応答曲面法（H-RSM）を提案している．本章では，非階層・階層型クラスタリング手法を併用することで，H-RSM を基本とした，大規模データからの属性抽出の効率化や有意変数の選択を行っている．したがって，多峰性問題は回避でき，より簡易的に応答曲面近似式が導出できると考えられる．例として，クラスタ 2 の側面加工において，選択された有意変数を用いて導出された切削条件決定式を式(6-1)~(6-4)に示す．

$$Ad(R^2_{ad}0.93) = 3z + l + 0.35Dz - 0.31Dl - 0.28zl + 0.29D^2 + 0.075l^2 - 15 \quad (6-1)$$

$$Rd(R^2_{ad}0.75) = 0.75D - 0.24l + 1.17HRC + 0.019Dl - 0.17DHRC + 0.0058lHRC - 0.017D^2 - 0.0052l^2 - 0.015HRC^2 - 23 \quad (6-2)$$

$$V(R^2_{ad}0.79) = 5D + 129z + 75HRC - 0.6Dz - 1.7zHRC - 0.09D^2 - 3z^2 - HRC^2 - 1657 \quad (6-3)$$

$$f(R^2_{ad}0.72) = 0.022D - 0.0040l + 0.042HRC - 22 \times 10^{-5}DHRC - 34 \times 10^{-6}D^2 - 57 \times 10^{-6}l^2 - 53 \times 10^{-5}HRC^2 - 0.82 \quad (6-4)$$

導出された応答曲面近似式の予測精度の判断には，単位自由度あたりの残差を比較する必要があり，一般的には自由度修正済み決定係数 R^2_{ad} が用いられる⁷⁶⁾．式を構成する各変数は回帰係数の t 検定の有意性により選択する．この t 検定によって，回帰式への寄与度が低い係数を棄却し，より R^2_{ad} の高い近似式にする．例えばクラスタ 2 では式の導出に有意な変数として D, l, z, θ, HRC が採用されているが，t 検定の有意性判断によって，各目的変数に対して 3 変数以下となるように選択を行った．

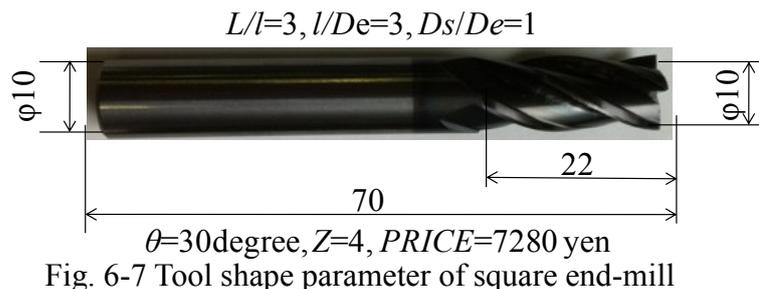


Fig. 6-7 Tool shape parameter of square end-mill

図 6-6 にクラスタ 2 の目的変数 V に関して、式(6-3)の導出式の値 (Mined condition) とカタログ推奨条件の関係を示した。工具カタログが推奨する切削速度 V は大きく 2 つの範囲に分割できる。すなわち、20-40 m/min (Inconel718) および 30-150 m/min (JIS SUS304, Ti-6Al-4V) であり、Inconel718 の切削速度が他の被削材料に比べて低速側に分布していることから、Inconel718 が特に難削であることがわかる。また、図 6-6 より、式(6-3)より導出されるマイニング推奨条件は Inconel718 に対して 10-70 m/min, JIS SUS304 および Ti-6Al-4V に対して 10-150 m/min である。ここで、マイニング推奨条件が 80 m/min 以下の範囲において、対応するカタログ推奨条件値の分布の広がり (30m/min から 100m/min) が最大となることから、本章では上記範囲に存在する汎用エンドミルを対象として切削実験を行った。

6-5. ケーススタディ① (マイニング推奨条件, 標準条件用いた切削温度モニタリング)

6-5-1. 切削条件と実験概要

一般的に切削の難しさを評価するにあたり、切削抵抗、切削時の工具温度、被削材料の延性などが重要な評価指標となる⁶⁷⁾。一方で、技術者は切削抵抗や切削温度にもとづいて、最適な切削条件や加工法を決定することが多い。本章では、切削時の温度上昇を赤外線サーモグラフィによって計測することにより、導出された切削条件の実用性を評価した。

条件式の評価を行う際に、式(6-1)~(6-4)の導出式の値 (Mined condition) および難削材加工に関して見識のある技術者によって決定された標準切削条件 (Standard condition) を用いて、JIS SUS310S (25Cr-20Ni, HRC35) の角材 (寸法 100×100×50mm) の側面切削を行った。ステンレスの中でも、SUS310 はニッケルが 20%程度含まれるため、ニッケル基合金に近くエンドミル加工における難削材の一種と考えられる。切削には、図 6-7 に工具形状の緒元を示した、クラスタ 2 に属する段付き形状のない比較的安価な汎用超硬スクエアエンドミル ($D10 \text{ mm}$ および $D6 \text{ mm}$, TiAlN コーティング) を用いた。

表 6-1 に式(6-1)~(6-4)の導出式に図 6-7 の工具形状パラメータおよび被削材硬さを代入し

Table 6-1. End-milling conditions

	Mined condition			Standard condition		
	Spindle speed rpm	1350	2700	5400	715	1430
Table Feed mm/min	270	540	1080	140	280	560
Cutting speed V m/min	43	85	170	23	45	90
Feed rate f mm/tooth	0.05			0.05		
Axial depth of cut Ad mm	15			20		
Radius depth of cut Rd mm	1.0			1.0		
MRR cc/min	4	8	16	3	6	12

たマイニング条件と標準切削条件を示す。切削時の温度上昇の比較基準として、基準となるマイニング条件（2700 rpm, 540 mm/min）および標準切削条件（1430 rpm, 280 mm/min）を基準として、それぞれ切削速度を 1/2 倍, 2 倍にした条件においても切削を行った。標準切削条件に比べて、マイニング条件は V で約 2 倍ほど高く、 Ad で 25%ほど低い値である。マシニングセンタによって平面の加工（ダウンカット, 1 方向パス）を行った。工作機械は前章と同様に ACCUMILL4000 を用いてスプリングコレットタイプのホルダー（BT30-NBS20-60）にてエンドミルを保持した。工具振れは 5 μ m 以下で切削を行った。また工具突き出し量は 30mm とした。クーラントは、加工後の切り屑の再巻き込みを防ぐために圧縮空気を吹き付けるドライエア法、環境対応技術として着目されている切削点に最小限の植物油を供給する MQL（Minimal quantities of lubricant）法（潤滑油；ブルーベ LB-1 供給量 6cc/h）を用いた。

6-5-2. サーモグラフィ赤外線画像の取得方法

図 6-8 は、エンドミル加工プロセスを赤外線サーモグラフィでモニターするための配置図である。エンドミル加工の側面切削（X-Y 平面内でダウンカット時）を対象とした。使用したマシニングセンタは X 軸, Y 軸テーブル移動型であるので、X-Y 平面内の運動による加工において、エンドミル工具は回転のみで移動していない。赤外線画像は工作物の進行方向の法線に対して 150°方向から赤外線サーモグラフィで撮影した。撮影の鉛直方向（Z 方向）の高度は、エンドミルと同一（真横）とした。撮影に使用したサーモグラフィは NEC Avio 赤外線テクノロジー社製 H2640 で、温度分解能は 0.03°C, 2 次元マイクロボロメータ 640×480 画素, 検出波長 8~13 μ m, 最小空間分解能 0.18mm である。図に示す対象から 1.5m の撮影距離において空間分解能は 0.9mm 程度で、30 枚/s の連写にて記録した。

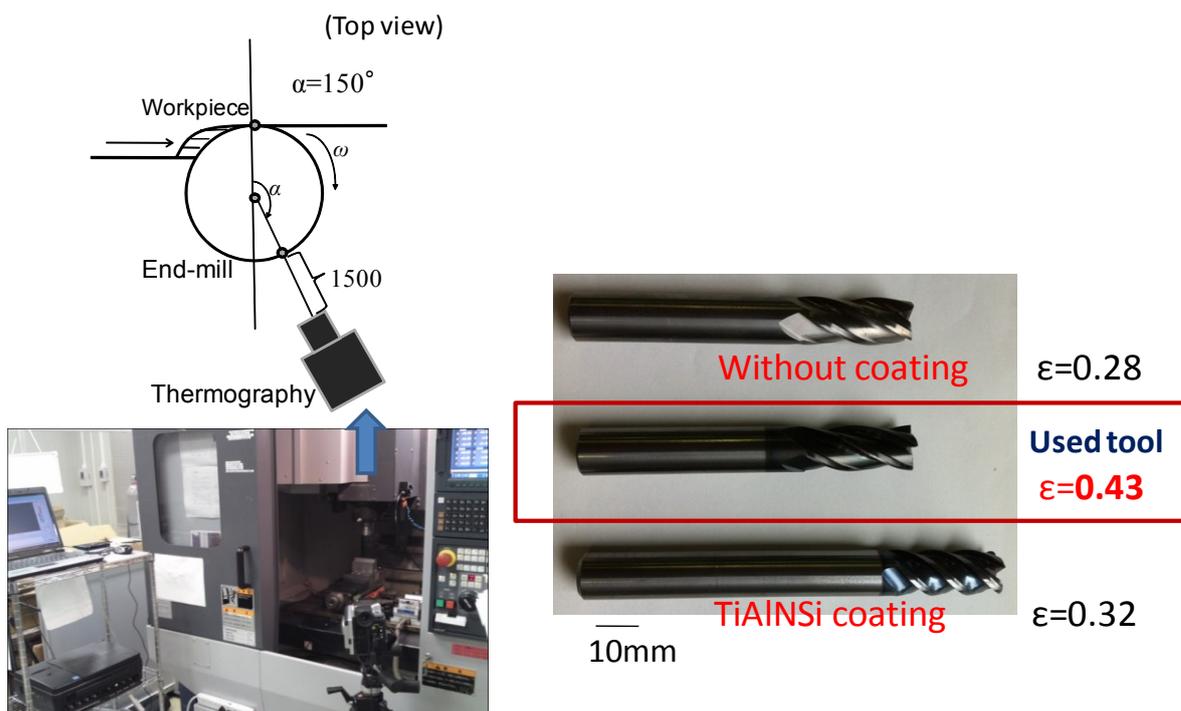


Fig. 6-8 Setup for monitoring end-mill process Fig. 6-9 Emissivity of used end-mill tool

工具の表面の放射率 ε は、加熱雰囲気中にエンドミル工具を保持して校正した。厳密には放射率は温度の関数でもあるが、本章では 80°C の放射率を採用した。図 6-9 に、超合金のエンドミル、使用したエンドミル、難削材用に市販されている TiAlNSi コートのエンドミルの放射率を示す。超合金の表面は銀白色で極めて低い放射率であることがわかる。一方、AlTiN や TiAlNSi コートはグレー色に近く、その表面の放射率が高いこともわかる。表面の放射率が高い方が、赤外線サーモグラフィによる温度計測に適している。近年、工具メーカーの工具コート技術の進歩は目覚ましく、それらのコート面はグレー系の色を示している場合が多い。したがって、最新の工具において本手法の適用が容易である可能性が高いこともわかる。

6-5-3. モニター画像と工具温度

図 6-10(a) は、工具刃先を 2 次元切削モデルで表現したものである。エンドミル加工現象においては工具と工作物の接触部における相対運動により、切り屑内の塑性流動および工具と切り屑・工作物の摩擦が生じる。その結果、それらの現象における摩擦仕事により熱エネルギーが発生して、①切り屑、②工具、③工作物、の温度の上昇が起こる。特に重要なのは工具へのダメージで、したがって工具の温度が重要なパラメータとなる。例えば、図 6-10(b) に示されるように、エンドミル加工時のクーラントをドライエアと MQL とすると、両者で

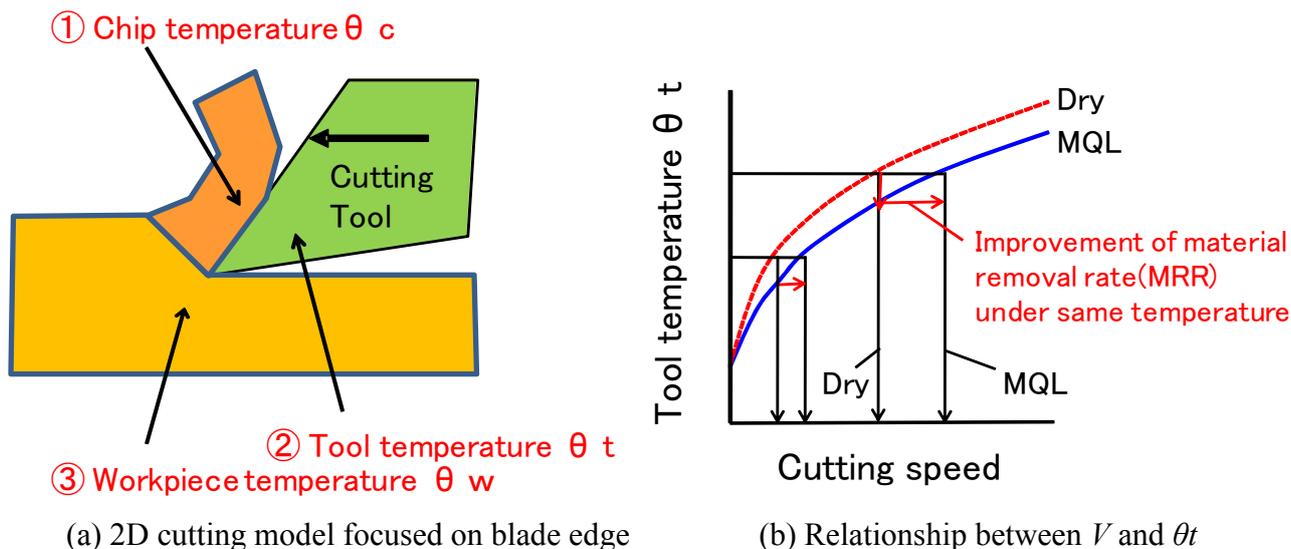


Fig. 6-10 Relationship between tool temperature and cutting speed

工具の温度に差が生じていると考えられる。工具コストを一定（工具の加工時の温度を一定）とすると、ドライに比べて MQL では切削速度を上昇させることが可能になる。すなわち、切り込み、送り量は一定とすると、主軸回転数を増大させることが可能で、テーブルの送り速度 F を上昇させることになる。その結果、 V に比例して MRR を上昇させることが可能になる。

従来はクーラント条件を変更した場合など、現場において試行錯誤を繰り返して適切な切削速度を探索していた。容易に工具温度がモニターできるなら、その温度を基準にして、迅速に論拠および戦略を持った切削速度の設定についての考察ができると考えられる。

図 6-11 は、得られたサーモグラフィ画像の一例（工具直径 10mm, 切削速度 45m/min, 送り量 0.05mm/tooth, 軸方向切り込み 20mm, 径方向切り込み 1mm）である。画像からは、切り屑、加工面およびエンドミル工具の温度情報が取得可能であることがわかる。しかしながら、対象物に応じた放射率を設定しないと各々の正確な温度にはならない。そこで本章では、エンドミル工具の温度にのみ着目して考察を進める。

6-5-4. エンドミル加工中の工具温度の変化

図 6-12 は、表 6-1 の標準条件で工作物の 1 辺（100mm）をエンドミル加工した時のエンドミル工具の加工初期および終期の温度の違いを示す。図 6-12 からわかるように、工具の右側が切削点に近く、温度が高い傾向にある。また加工初期は最高温度で 180°C 程度である

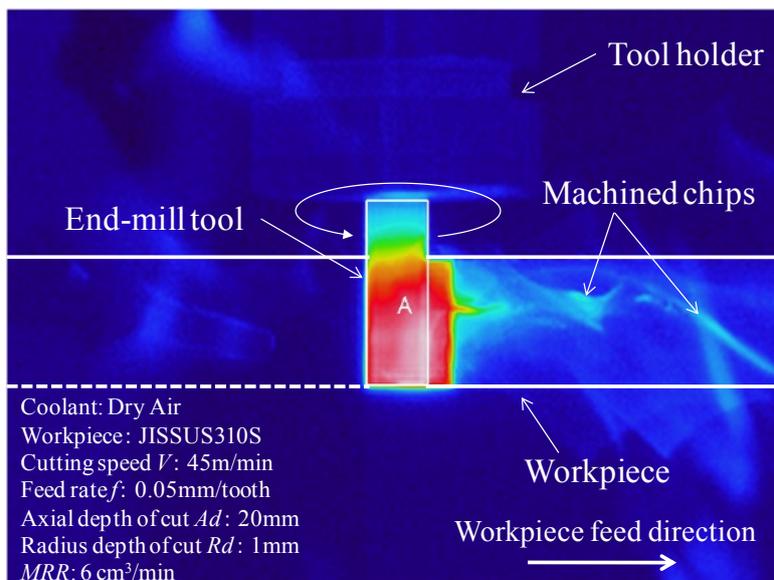


Fig. 6-11 Thermal image of dry cutting under standard condition

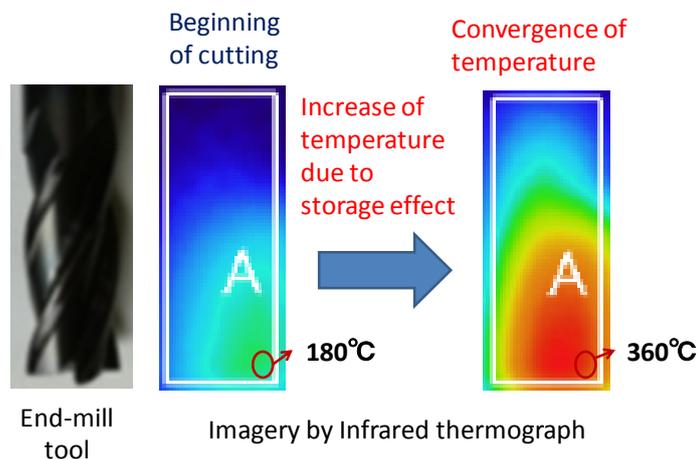


Fig. 6-12 Obtained imagery of end-mill tool

が、加工が進行すると蓄熱作用により 360°C程度まで最高温度が上昇することもわかる。

図 6-13 は、工具径 6mm および 10mm のエンドミルにおいて、工作物の 1 辺を加工した時の図 6-12 中に示されている最高温度を各時間でプロットした結果である。表 6-1 の標準条件に基づいており、工具径を変更しても切削速度は同一である。工具径 6mm と 10mm を比較すると、加工開始の初期では両者の温度はほぼ一致している。しかしながら、加工開始後 1s 程度から温度に差がみられ、工具径 6mm の方が高い温度を示している。工具径 6mm では加工開始後 3s 程度で温度が一定値、工具径 10mm では加工開始後 7s 程度で温度が一定値に達して熱平衡状態に達したものと考えられる。この温度差や一定温度に達するまでの時間の差は、工具の熱容量の差が現れているものと考えられる。また図から、クーラント条件の

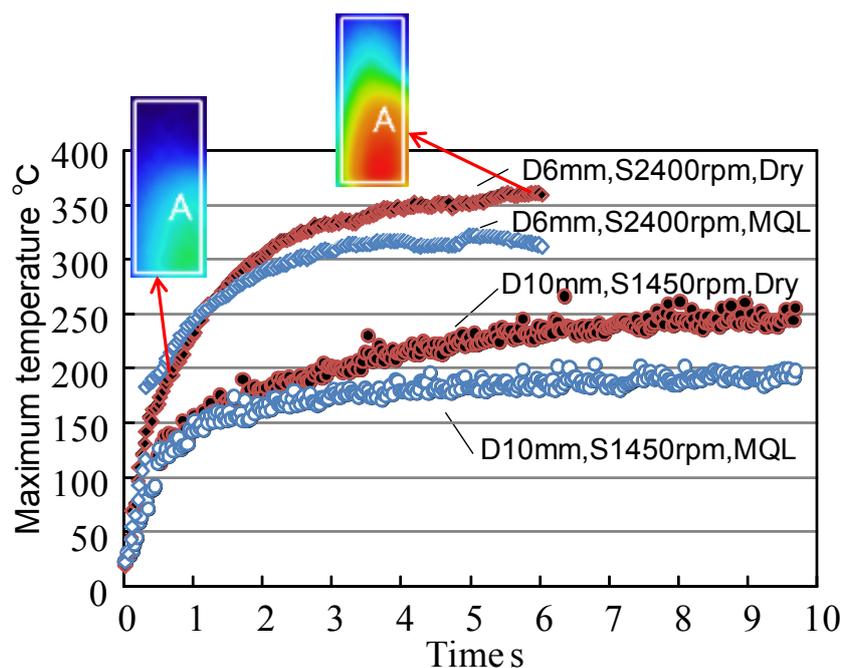


Fig. 6-13 Maximum temperature in end-mill process

違いによる工具の温度差もわかる。

一般に切削条件の選定において、切削速度の設定は極めて重要な項目である。切削速度を高く設定すれば、切削時の工具温度も上昇する。しかしながら、加工時の熱平衡を考え、工具側の熱容量の影響を考慮する場合は少ない。本モニター手法の結果を用いることで、工具の熱容量 (D , D_e , L , l の関数) の変化も考慮しながら工具側の温度を評価できることがわかる。

6-5-5. 工具温度と加工能率の関係

単位時間当たりの除去体積 MRR と加工時に熱平衡状態にある工具の最高温度との関係を調べた結果を図 6-14 に示す。表 6-1 に示す条件に対して、切削速度を 1/2 倍, 2 倍 (送り量, 軸方向切り込み, 径方向切り込み=一定) することで, MRR が異なる条件を設定した。図より, MRR を増加させると工具の温度も上昇する傾向にあることがわかる。一方, MRR が同一であっても工具の最高温度は 50~100°C 程度の差があることがわかる。したがって, 加工能率が同じでも加工条件の設定次第により, 工具の寿命までの時間がかかなり異なることが予想される。

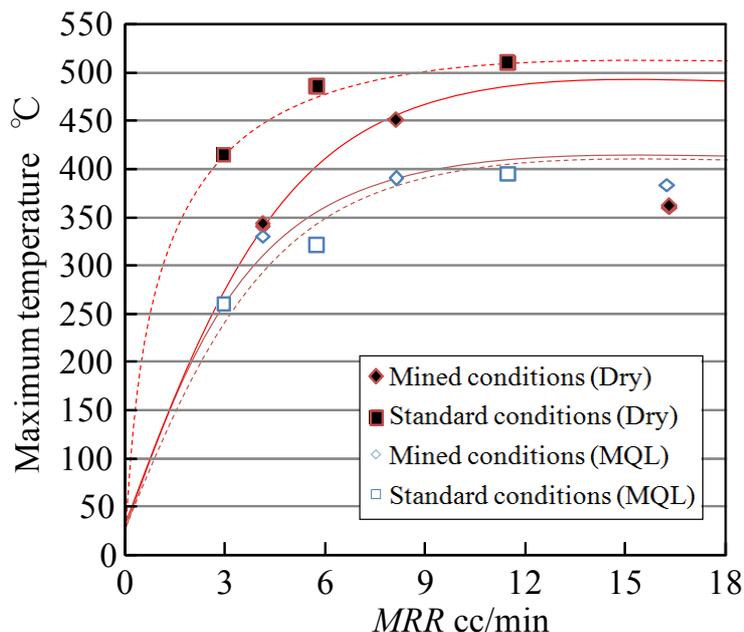


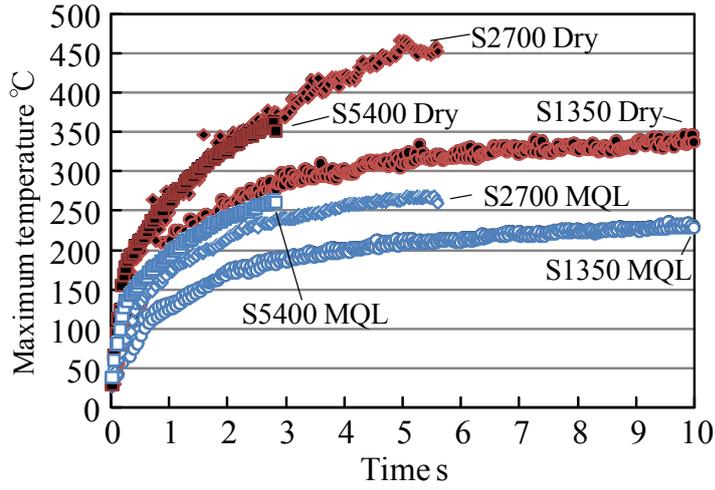
Fig. 6-14 Influence of MRR on maximum temperature

表 6-1 から、マイニング条件は標準条件に比べて MRR が高いが、温度モニタリングの結果より、切削温度はドライおよび MQL 環境化においてほぼ同程度であることから、マイニング条件は標準的に指針となる切削条件として実用的であることが示された。

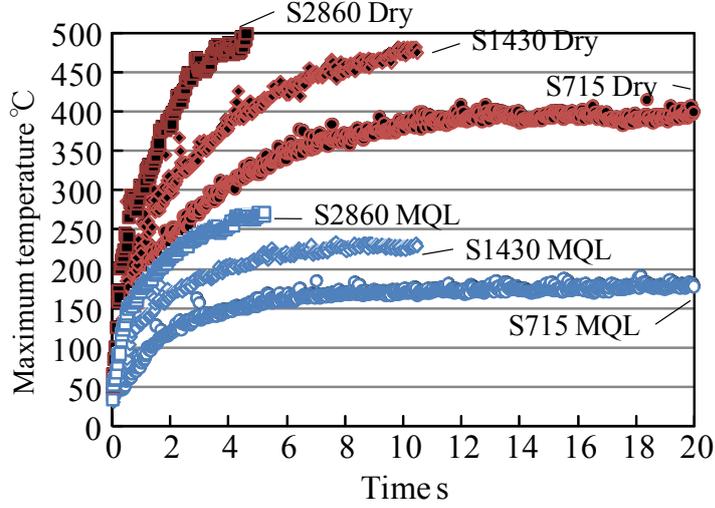
6-5-6. 工具温度の評価精度の検討

図 6-14 において、クーラントにドライエアを用いた場合に比べて MQL を用いた場合の温度の差が 20~50°C 程度（同一のエンドミル加工条件において）と僅かであった。しかしながら、クロムモリブデン鋼の旋削加工において、MQL を用いることで 100°C 以上の大きな温度低減の効果が期待できることが報告⁷⁾されており、それらの知見との相違点が残っていた。一方、金属表面に薄くオイルを塗布するだけで放射率が大きく変化する可能性があることが判明¹²⁾している。そこで本節では、MQL に用いた潤滑油（ブルーベ LB-1）をエンドミルに薄く塗布して、放射率の再検討を行う。

図 6-9 に示すエンドミルに対して潤滑油を薄く塗布すると、超硬合金、AlTiN、TiAlNSi コート面はそれぞれ放射率 $\epsilon=0.6$, 0.8, 0.6 になることが判明した。すなわち、薄くであるが潤滑油が塗布されることで、無視できない範囲で工具表面の放射率が変化することがわかった。したがって、極微量でも潤滑油を供給してその皮膜を工具表面に形成させるような加工法を対象にする場合、その潤滑油皮膜の影響も考慮した放射率の設定が必要であることが



(a) Mined condition



(b) Standard condition

Fig. 6-15 Maximum temperature in end-mill process considering modified emissivity

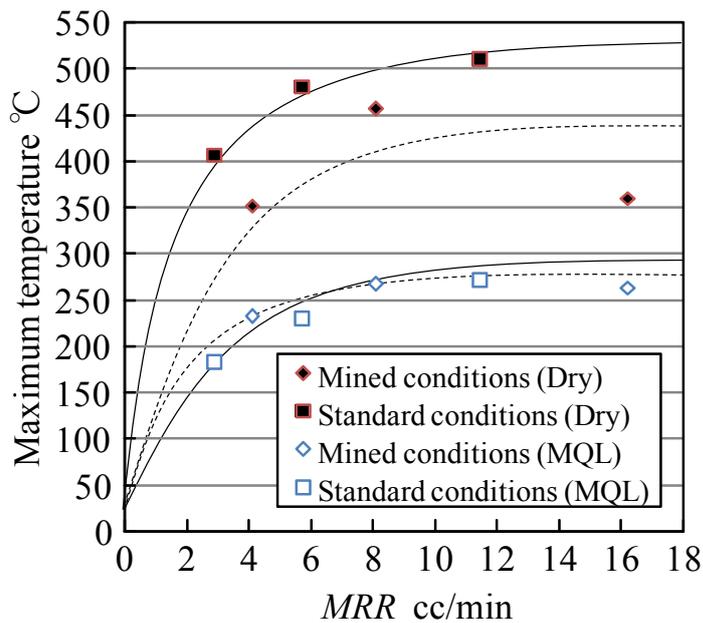


Fig. 6-16 Influence of MRR on maximum temperature considering modified emissivity

わかった。

図 6-15 は、図 6-13 において MQL の場合に対して放射率の再設定を行った結果である。図 6-16 は、図 6-14 において MQL の場合に対して放射率の再設定を行った結果である。図 6-15 より、クーラントを MQL に変更することで、加工時の工具温度が大きく（100℃以上）低下していることが示されている。これは 2 色温度計で計測した結果⁷⁸⁾と一致している。したがって、定量的に温度の計測ができたものと考えられる。図 6-16 より、切削条件およびクーラント条件による工具の温度抑制の効果の割合を明確にできることもわかる。また MQL における工具温度を比較すると、 $MRR=7.0$ cc/min 付近で標準条件とマイニング条件で上下関係が逆転する様子がわかる。工具の温度上昇を支配する因子は複雑であるため、工具の温度をモニターしながら設定条件を検討する必要があることが示唆されている。

6-6. ケーススタディ②（各難削材加工に対応した指針となる切削条件の抽出）

前節までに、難削材加工用の工具カタログデータに提案するカタログマイニング手法を適用することにより、実用的な切削条件の導出が可能であることが示唆された。そこで提案するカタログマイニング手法の有用性を検証するため、A 社以外の工具カタログに提案手法を適用することによって、提案手法の一般性を検証する。

図 6-17 に本節で遂行したカタログマイニングプロセスを示す。本節では、前節で対象としたデータベースに対して、新たに日本国内において難削材加工用エンドミルの製作に実績のある工具カタログメーカーである B 社、C 社のデータを加えてカタログマイニングをおこなう。また K-means 法において、不等ピッチ・リードエンドミルの工具形状の特徴をあらわす相当刃長 le を新たに導入した。そこで各難削材料（JIS SUS304 および SUS316, Ti-6Al-4V, Inconel718）ごとに、切削条件決定に有意な変数を抽出し、難削材加工に対して実績のある日本国内の代表的な工具メーカーが推奨するカタログ条件から、各難削材に対して平均的に指針となる切削条件（切削速度）を定量的に導出する。また K-means 法における新しいクラスタリングの変数として、不等ピッチ・リードエンドミルの刃部形状を幾何学的に特徴付ける工具形状パラメータを導出することにより、不等ピッチ・リードエンドミルおよび汎用エンドミルに対して、それぞれ指針となる切削速度の提案および妥当性の検討を行った。

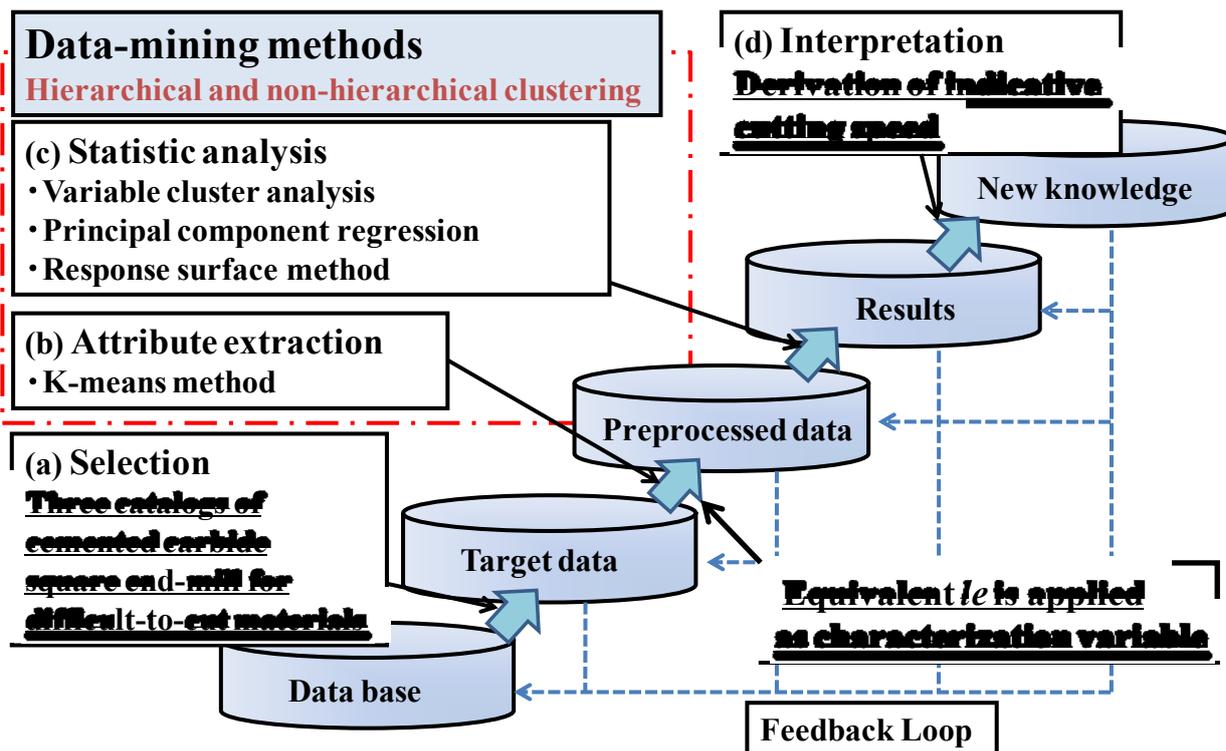


Fig. 6-17 Catalog mining process proposed in this chapter

6-6-1. ターゲットデータの取得

ターゲットデータとして、国内大手 A 社の他に、国内大手 B 社、C 社 2011-2012 年度版の工具カタログを加えた中から、超合金製スクエアエンドミルを選択した。カタログに切削条件が記されているデータ（総数は 3276 項に及ぶ、工具径で 0.1mm~32mm）をデータベースとした。説明変数は、前節までと同様に、工具カタログに記載されている工具形状パラメータおよび、各難削材料の被削材硬さとした。ターゲットデータに対して、各被削材料が占める割合はそれぞれ、JIS SUS304 および SUS316 (45%)、Ti-6Al-4V (30%)、Inconel718 (25%) であった。新たに B 社、C 社のカタログデータを追加したことで、ターゲットデータの総数は増加したが、オーステナイト系ステンレス鋼がデータの中で最大数を占め、超耐熱合金が最少数を占める傾向は変わらなかった。目的変数は、前節と同様に、重要な加工条件因子である切削速度 V m/min, 送り量 f mm/tooth, 軸方向切込み量 A_d mm, 側面加工では径方向切込み量 R_d mm を目的変数とした。

6-6-2. 工具形状のモデル化と相当刃長 l_e の定義と提案

本節のターゲットデータとして採用した 3 社の工具カタログには、汎用工具だけでなく、難削材加工において問題となるびびり振動が抑制可能な各刃でねじれ角の異なる不等ピッ

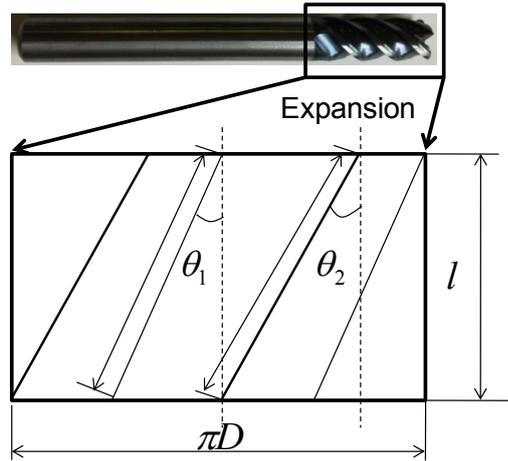


Fig. 6-18 Definition of le

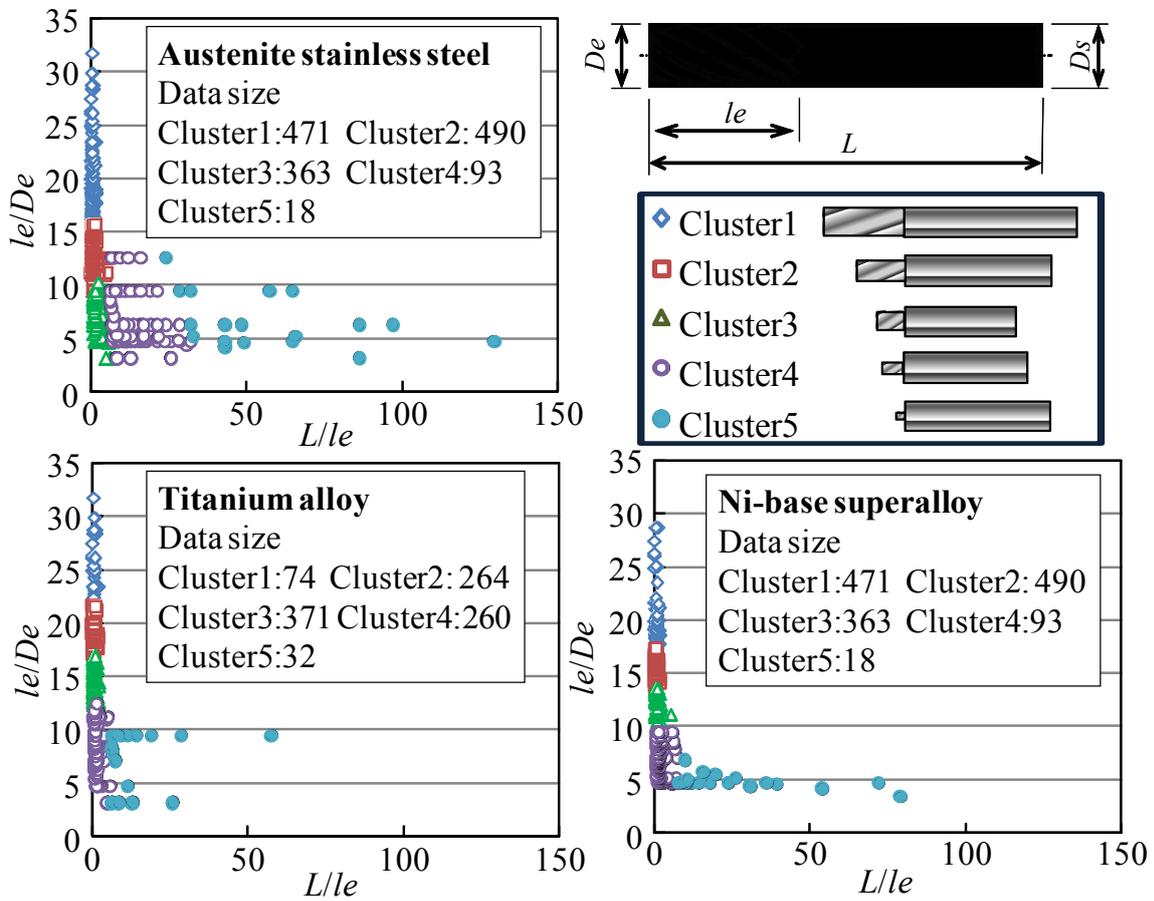


Fig. 6-19 Results of K-means method for each difficult-to-cut materials

チ・リードエンドミルが含まれている。不等ピッチ・リードエンドミルの刃部（円筒形）を展開した図を図 6-18 に示す。本節では，不等ピッチ・リードエンドミルの刃部の特徴に注目することにより，エンドミル工具形状を表す特徴的な変数として，相当刃長 le を定義し

た。ここで le は、図 6-18 にて実線で示される正味のエンドミル切れ刃長さを幾何学的に計算することにより、式(6-5)のように定義できる。

$$le = \frac{zl(\cos\theta_1 + \cos\theta_2)}{2\cos\theta_1\cos\theta_2} \quad (6-5)$$

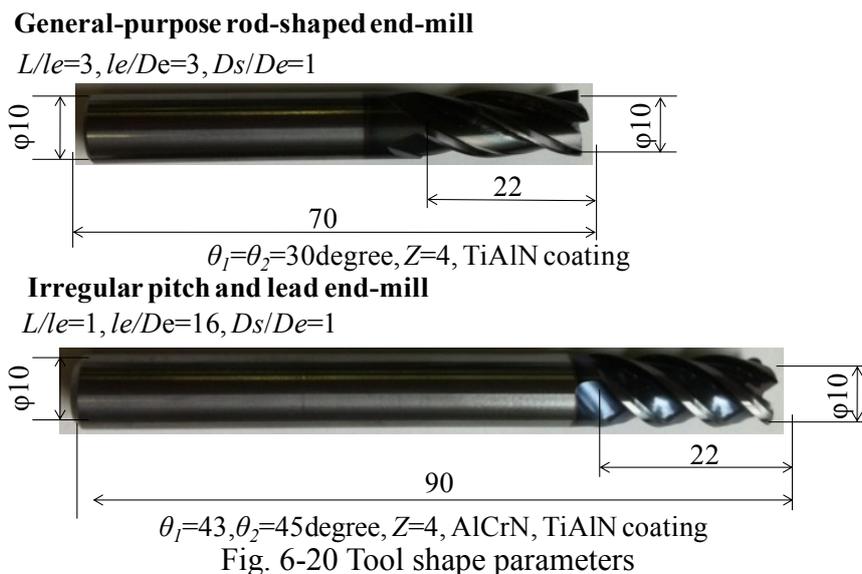
le を新たに導入して、スクエアエンドミルを工具形状比 (L/le , le/De , Ds/De) によりクラスタ分けした結果および各クラスタのデータ数、各係数の平均値を、図 6-19 に示す。クラスタの数は前節と同様に 5 つとした。 L/le および Ds/De が増大するにともなって、工具外径は小径化していく。また le/De の増加によって、エンドミルの刃数も増加していく。上記の傾向は、B 社、C 社のデータを追加して、すべての難削材料を混合した前節までの傾向と同じであった。 le/De が 10 から 35 の範囲内に存在するエンドミルは主に、不等ピッチ・リードエンドミルで構成されている。すなわち、 le を導入することにより、汎用工具と不等ピッチ・リードエンドミルを効果的に分別してクラスタ分けできた。クラスタ 1, 2 および 3 を構成する工具はすべて、 D と Ds の比が 1 の段付きのない工具であり、主に不等ピッチ・リードエンドミルで構成されている。クラスタ 4 はオーステナイト系ステンレス鋼を除いて、主に段付き形状のない汎用工具で構成されている。クラスタ 5 は工具径 D が 1.0mm 以下の小径エンドミル (L/le 大, Ds/De 大) によって構成されている。前節までと同様に、各クラスタにおいて、側面加工用および溝加工用エンドミルとして用途別にさらにデータを 2 分化する。その結果、各難削材料ごとに、合計で 8 つの属性を抽出することができる。

6-6-3. 切削条件決定に有意となる説明変数の選択

前節では比較的安価で汎用的なエンドミルが含まれるクラスタに注目して、切削条件決定式を導出した。本節では、汎用エンドミルおよび不等リード・ピッチエンドミルに対して、条件決定に対して有意となる説明変数を抽出することが目的であるため、各難削材ごとにそれらの工具が多く含まれているクラスタを対象として、変数クラスタ分析および主成分回帰を適用する。図 6-20 に解析対象とするエンドミルの概要を示す。図 6-19 を参照して、各難削材において、図 6-20 に示すエンドミルが主に所属するクラスタを以下に示す。

オーステナイト系ステンレス鋼 (JIS SUS304, SUS316) : 汎用エンドミル (クラスタ 1), 不等ピッチ・リードエンドミル (クラスタ 3)

チタン合金 (Ti-6Al-4V) : 汎用エンドミル (クラスタ 3), 不等ピッチ・リードエンドミル (クラスタ 4)



Ni 基超耐熱合金 (Inconel718) : 汎用エンドミル (クラスタ 2), 不等ピッチ・リードエンドミル (クラスタ 4)

図 6-21 に示すように、該当する各クラスタに対して、変数クラスタ分析を適用することで得られた樹形図はすべてのクラスタで同一であった。例として、オーステナイト系ステンレス鋼について、クラスタ 1 および 3 の側面加工、溝加工用のデータに対して、主成分回帰を行った結果を図 6-22 に示す。

図 6-21 より、各クラスタにおいて、工具寸法形状を表す説明変数 (D と D_s , L , l) とねじれ角 θ と刃数 z の 3 つの階層クラスタに分けられることがわかる。被削材硬さごとにターゲットデータを分類したため、 HRC は各工具に対して同値である。そのため、変数クラスタ分析において、 HRC の階層クラスタを形成することはできない。ゆえに、図 6-21 において、 HRC は除外される。 θ および z は単体で階層クラスタを構成しているため、工具寸法形状を表す説明変数との相関は低いことがわかる。汎用エンドミル、不等リード・ピッチエンドミルの各クラスタで、得られた樹形図が同一であることから、難削材加工においては、汎用エンドミルと不等リード・ピッチエンドミルの説明変数の相関関係の強さは同一の傾向を示していることがわかる。図 6-22 より、加工法 (側面加工、溝加工) に注目すると、汎用および不等リード・ピッチエンドミルでは同様の傾向がみられる。すべての属性において、 V は z と正の相関関係を (C_p , 0.5-0.6) を有している一方で、 V は D と D_s , L , l に対しては、正の相関関係が弱いことがわかる。つまり、 V の条件導出には z が他の工具形状を表す説明変数と比較して支配的であることがわかる。 Ad , Rd および f は D と D_s , L , l に対して正の

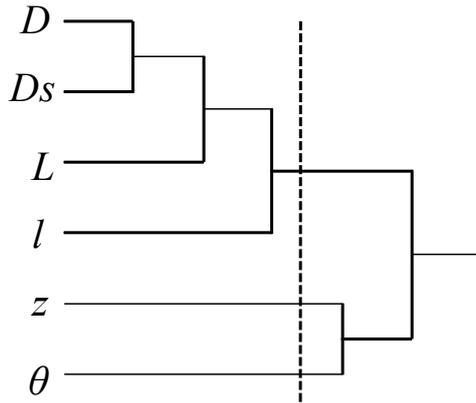


Fig. 6-21 Result of variable cluster analysis

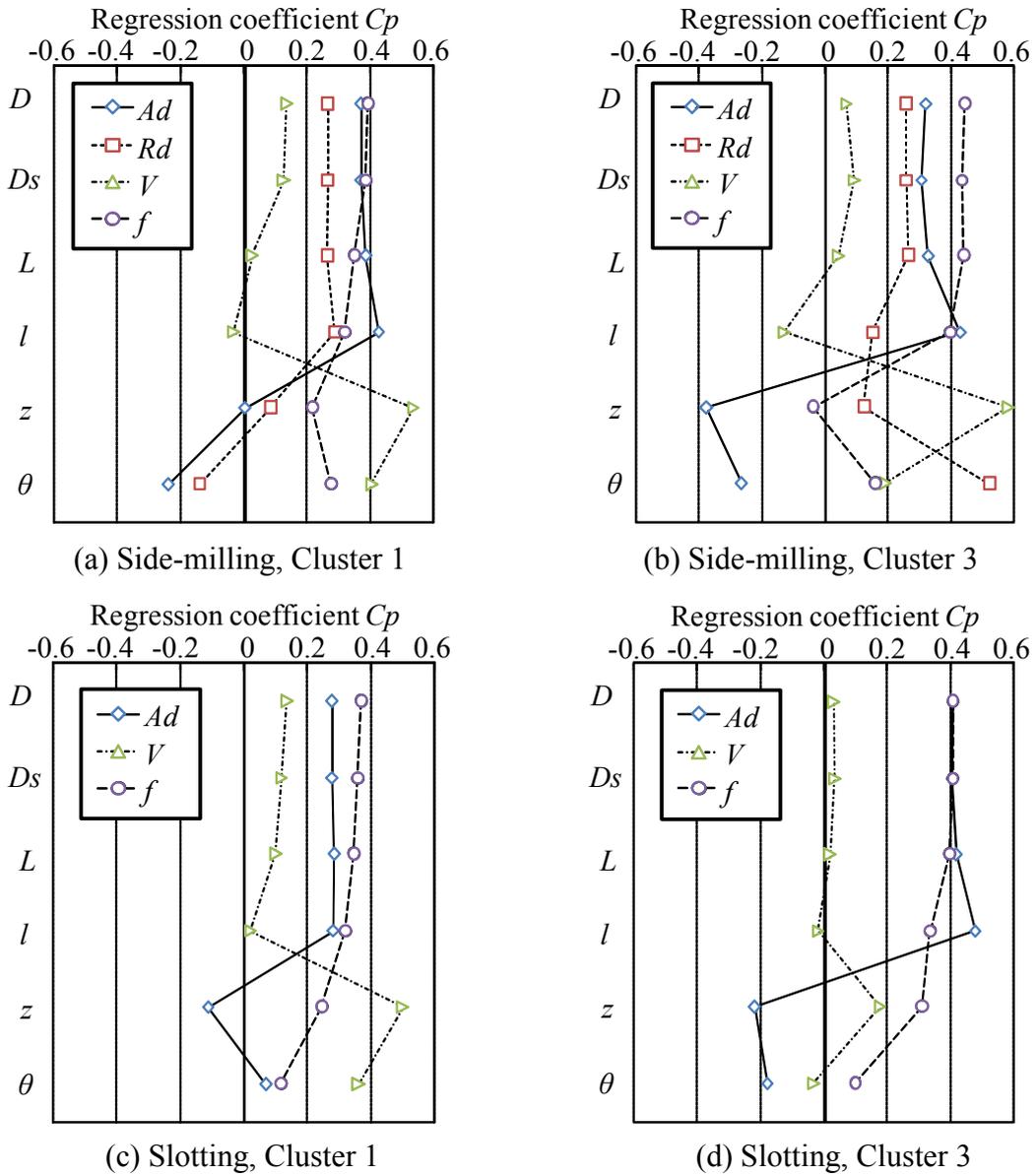


Fig. 6-22 Results of PCR for austenite stainless steel

相関関係を有している。θ は Ad に対してのみ、正の相関関係を有している。側面加工においては共通の傾向がみられる。不等ピッチ・リードエンドミルが含まれるクラスタ 1 において、θ は Rd と負の相関関係を有しており、汎用エンドミルで構成されるクラスタ 3 においては正の相関関係を有している。このことから、工具カタログでは、不等ピッチ・リードエンドミルを用いた高速切削加工においては、 Rd を低めに設定している傾向がわかる。これらの傾向は、チタン合金、Ni 基超耐熱合金に対しても同様にみられることから、日本国内の工具カタログでは難削材加工用の切削条件決定に関して、同様の決定指針が隠されていることが判明した。前節と同様にして、これらの図をもとに、切削条件決定に有意となる説明変数を選択していく。

6-6-4. 切削条件決定式の導出

前節より、各難削材における、各エンドミルに対して、同様な傾向が見られたことから、抽出された有意変数もすべての場合において同一であった。すなわち、有意となる説明変数はすべてのクラスタにおいて、 D 、 θ 、 z の 3 つが選択された。例として、オーステナイト系ステンレス鋼の不等ピッチ・リードエンドミルが含まれるクラスタ 1 において、選択された有意変数を用いて 2 次の応答曲面法により導出された切削条件決定式を式(6-6)~(6-12)に示す。

1. クラスタ 1 (側面加工)

$$Ad(R^2_{ad}0.55) = 2D + 3z - 0.30D \cdot z + 0.02D^2 - 9.38 \quad (6-6)$$

$$Rd(R^2_{ad}0.43) = 0.40D - 0.60z + 0.01z \cdot \theta - 0.01D \cdot \theta + 0.002D^2 + 0.32 \quad (6-7)$$

$$V(R^2_{ad}0.54) = 4D + 105z - D \cdot z - z \cdot \theta - 0.1D^2 - 2z^2 - 298 \quad (6-8)$$

$$f(R^2_{ad}0.76) = 0.001D + 0.10z + 0.0016\theta + 14 \times 10^{-5} D \cdot \theta - 19 \times 10^{-4} z \cdot \theta - 15 \times 10^{-5} D^2 - 26 \times 10^{-4} z^2 - 1.0 \times 10^{-4} \theta^2 - 0.57 \quad (6-9)$$

2. クラスタ 1 (溝加工)

$$Ad(R^2_{ad}0.57) = 0.016D \cdot \theta - 0.11D \cdot z + 33 \times 10^{-4} D^2 + 14 \times 10^{-4} \theta^2 + 2.58 \quad (6-10)$$

$$V(R^2_{ad}0.47) = 12\theta - 1.7z + 0.02D \cdot \theta - 0.03D^2 + 2z^2 - 0.14\theta^2 - 250 \quad (6-11)$$

$$f(R^2_{ad}0.65) = -0.081z + 0.021\theta + 54 \times 10^{-5} D \cdot z + 12 \times 10^{-5} D \cdot \theta - 15 \times 10^{-5} D^2 + 82 \times 10^{-4} z^2 - 28 \times 10^{-5} \theta^2 - 0.20 \quad (6-12)$$

ほとんどすべての条件式において、自由度修正済み決定係数 R^2_{ad} が前節で導出した条件式

($R^2_{ad}=0.72\sim0.93$)と比較して低い結果となった。前節と同様に、式を構成する各変数は回帰係数の t 検定の有意性により選択した。

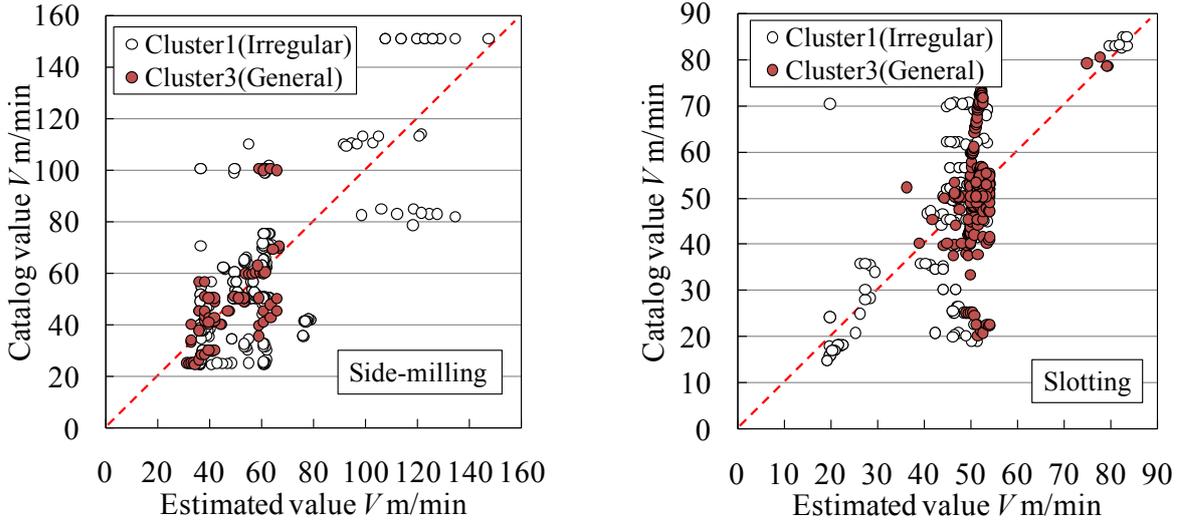


Fig. 6-23 Estimated cutting speed for austenite stainless steel

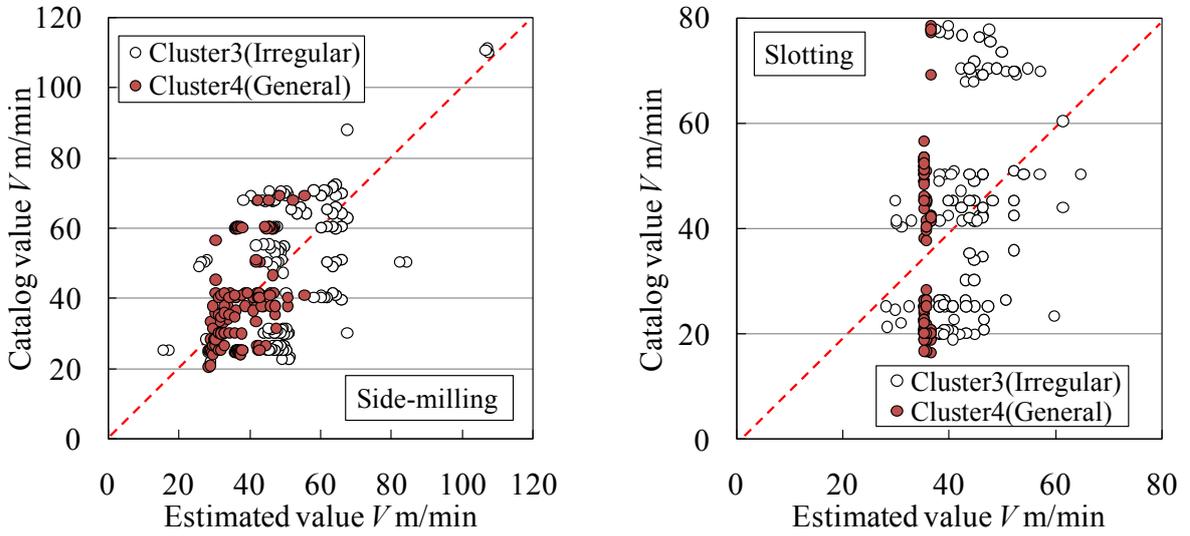


Fig. 6-24 Estimated cutting speed for titanium alloy

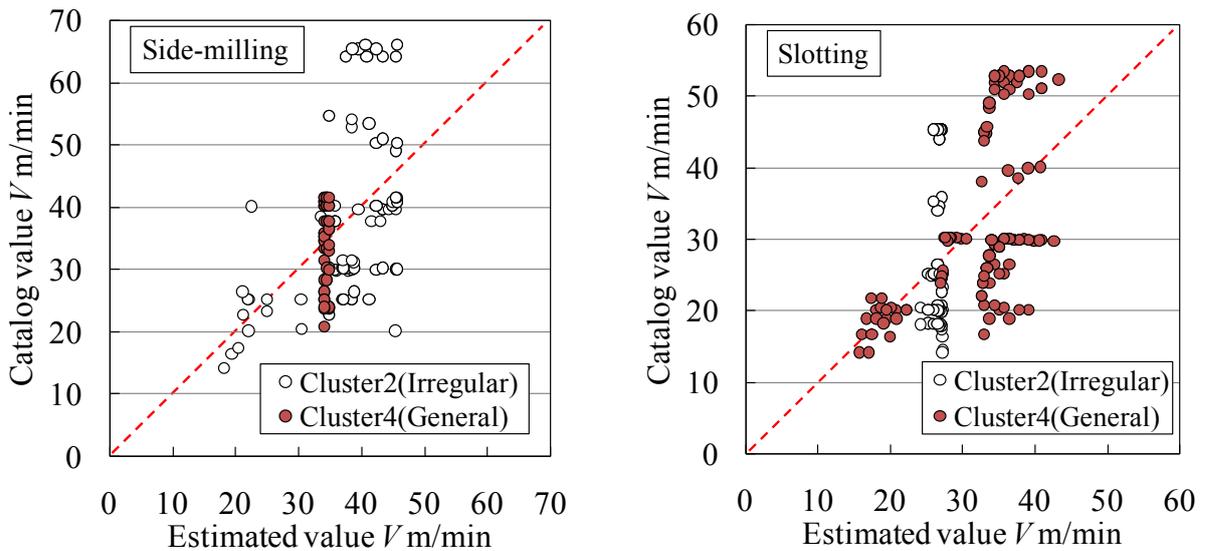


Fig. 6-25 Estimated cutting speed for Ni-base superalloy

6-6-5. 指針となる切削条件の導出

図 6-23, 6-24, 6-25 にそれぞれオーステナイト系ステンレス鋼, チタン合金, Ni 基超耐熱合金における, 不等ピッチ・リードエンドミル, 汎用エンドミルのカタログ推奨条件 (切削速度) とマイニング条件 (切削速度) の関係を示す. ここで図中の **General** は汎用エンドミル, **Irregular** は不等ピッチ・リードエンドミルをあらわす. 導出されたマイニング条件はカタログ推奨条件に比べて, 低速度であった. これらの図により, 日本国内 3 社の推奨する切削速度の総合的な指針となる切削条件が抽出できる. 図 6-26 に各難削材に対して抽出された切削条件の決定指針をまとめて示した.

1. オーステナイト系ステンレス鋼 (JIS SUS304, SUS316)

不等ピッチ・リードを用いた側面加工 (クラスタ 1) では, 導出されたマイニング条件の推奨値は 40-60 m/min, 100-140 m/min に大別できる. 切削速度の低い領域は, クラスタ 1 に含まれる汎用工具の特徴を表している. 切削速度の高い領域では, 主に刃先に丸ランドが施された不等ピッチ・リードのラジラスエンドミルが含まれている. 汎用エンドミルを用いた側面加工 (クラスタ 3) では, 導出されたマイニング条件の推奨値は 40-60 m/min であり, 前節でのケーススタディにおいて, 汎用エンドミルにより JIS SUS310S に対して, 推奨値の範囲内に存在する 45 m/min の条件で実用的な切削が行えた. それゆえ, 上記の範囲内に存在するすべての汎用エンドミルにおいて, 同様に実用的な切削が行えることが期待できる.

不等ピッチ・リードを用いた溝加工 (クラスタ 1) では, 導出されたマイニング条件の推奨値は 20-30 m/min, 40-50 m/min, 80 m/min に大別できる. 切削速度の低い領域では, D20 程度の比較的に大口径なエンドミルが占めており, 切削速度の高い領域では, 側面加工と同様に, ラジラスエンドミルが含まれている. 汎用エンドミルを用いた溝加工 (クラスタ 3) では, 導出されたマイニング条件の推奨値は 20-30m/min および 40-50 m/min であった.

2. チタン合金 (Ti-6Al-4V)

不等ピッチ・リードを用いた側面加工 (クラスタ 3) では, 導出されたマイニング条件の推奨値は 50-60 m/min および 100 m/min に大別できる. 切削速度の低い領域では, D20 程度の比較的に大口径なエンドミルが占めており, 切削速度の高い領域では, 側面加工ではラジラスエンドミルが含まれている. これはオーステナイト系ステンレス鋼の条件決定の傾向と似ている. 汎用エンドミルを用いた側面加工 (クラスタ 4) では, 導出されたマイニング条件の推奨値は 30-50 m/min であった.

Austenite stainless steel



Fig. 6-26 Indicative cutting speed derived from catalog-mining for difficult-to-cut materials

不等ピッチ・リードを用いた溝加工（クラスタ 3）では，導出されたマイニング条件の推奨値は 40-50 m/min であった．汎用エンドミルを用いた溝加工（クラスタ 4）では，導出されたマイニング条件の推奨値は比較的狭く，約 35 m/min であった．チタン合金の溝加工用の切削条件決定式は z のみで構成されていることから，日本国内の条件決定の傾向として，刃数 z が条件決定の重要なパラメータとなることがわかる．

3. Ni 基超耐熱合金（Inconel718）

不等ピッチ・リードを用いた側面加工（クラスタ 2）では，導出されたマイニング条件の推奨値は 40-50 m/min であった．びびり振動が抑制可能なエンドミルであっても，耐熱温度が高く，硬質な被削材になればなるほど，推奨される切削条件は低下する傾向がみられる．汎用エンドミルを用いた側面加工（クラスタ 4）では，導出されたマイニング条件の推奨値は約 34 m/min であった．

不等ピッチ・リードを用いた溝加工（クラスタ 2）では，導出されたマイニング条件の推奨値は 28 m/min であった．汎用エンドミルを用いた溝加工（クラスタ 4）では，導出されたマイニング条件の推奨値は 20 -45m/min であった．チタン合金の溝加工用の切削条件決定の

傾向と同様に、超耐熱合金においても刃数 z が条件決定の重要なパラメータとなることがわかる。

これらの結果より、日本国内3社の工具カタログに対して、提案する難削材加工用のカタログマイニングシステムを適用することにより、代表的な各種の難削材料加工において指針となる切削速度を導出することができた。

6-7. 結言

難削材加工用の工具カタログに対して、カタログマイニング手法を適用することにより、切削条件決定式の導出を行い、切削温度のモニタリングの観点から、マイニング条件の有用性を評価した。また不等リード・ピッチエンドミルを考慮するための新たな変数として、有効刃長 le を導入しカタログマイニングを適用することにより、以下の結果が得られた。

- (1) 切削条件決定式の導出に2次の応答曲面法を適用することによって、速度成分因子である切削速度や送り量の条件式の精度が向上できることを示せた。
- (2) 2次の応答曲面法を用いて導出されたマイニング条件は、技術者が提案する標準条件とほぼ同程度の切削温度であり、ある程度指標となる実用的な切削条件であることがわかった。
- (3) 赤外線サーモグラフィによる工具温度モニターにより、その温度を基準として迅速に論拠および戦略を持って条件の設定が可能であることが示された。また MRR を基準としてマイニング条件と経験的な条件の差についても明確化できた。すなわち、 MRR が同一であっても、工具の温度が大きく異なる場合があることが判明した。したがって、工具温度をモニターしながら適切な加工条件を探索する手法の有効性が示された。
- (4) 工具温度モニターにおいては、潤滑油などの有機物の皮膜は工具表面の放射率に影響を与えるため、MQL法など極微量の塗布であって、定量的な評価のためには放射率の設定には注意が必要であることもわかった。
- (5) 1本のエンドミル工具中におけるねじれ角の差に着目した相当刃長 le を K-means 法において導入することにより、効果的に不等ピッチ・リードエンドミルと汎用エンドミルをクラスタ分けすることが可能になった。
- (6) 他社の工具カタログにおいても、提案する手法の有用性を示せたことから、その提案手法の一般性を確認できた。また、切削速度に関して、各難削材ごとに加工法の違いを考慮した、指針となるシステム総合的な切削条件を定量化できた。

第7章 ボールエンドミル切削条件決定支援手法の提案

前章までにおいて、工具カタログデータに、階層・非階層型のクラスタリング手法を適用した切削条件決定支援システムを提案した。工具の種類として主にスクエアエンドミルを対象に、4章において、金型鋼粗加工用の切削条件決定支援手法の妥当性を実験的に検証した。5章では、実験計画法によって環境影響負荷の観点から最適切削条件を導出し、4章で導出されたマイニング条件およびカタログ推奨条件と比較することによって、マイニング条件を切削の初期段階で用いることの有用性を確認した。6章では、提案するカタログマイニングプロセスを難削材料に適用することによって、代表的な難削材料に関しては、ある程度の指針となる推奨切削条件を提案できた。近年の切削加工において、ボールエンドミルを用いた自由曲面加工が多用されており、工具カタログにおいても、スクエアエンドミルと同程度に、ボールエンドミルのバリエーションや加工法が充実してきている。そこで本章^{79)~81)}では、提案するカタログマイニングシステムをボールエンドミル工具カタログデータに適用することにより、ボールエンドミル切削条件の決定支援手法を提案した。また導出された切削条件の妥当性を、工具カタログに推奨条件の載っていない新材料に対して適用することでその結果を検証した。

7-1. 緒言

近年のCAD/CAMシステムの発展に伴い、熟練技術者でなくてもNCプログラムの作成が容易になった。切削工具としてエンドミルを用いる場合のNCプログラムにおいて、技術者は切削条件（スクエアエンドミル形状の場合、主な条件変数として、切削速度 V m/min, 一刃あたりの送り量 f mm/tooth, 軸方向切り込み量 A_d mm, 径方向切り込み量 R_d mm) の組み合わせを決定する必要がある。これらの切削条件は熟練技能者の知識や経験といった暗黙知によって決定されることが多い。一方で知識や経験の浅い非熟練技能者にとっては、例えば被削材形状や材質、コスト、納期を考慮した適切な切削条件や、工具形状を選択することは困難であるため、それらの決定には工具カタログに推奨されている切削条件を基準にすることが多い。切削条件決定の指針として、一般的にスクエアエンドミルは工程設計の中でも粗加工（主に側面加工や溝加工）に用いられることから、切削条件決定の中でも材料除去率を重視すれば良いといった具体的な指標がある。そのため工具カタログが推奨する切削条件は

一般的には材料除去率の最大化を指標とした条件設定がなされている。一方で、金型や部品の複雑形状化の要求や変種変量生産への傾向に対応するには、ボールエンドミルでの加工が適しており、一般的に広く使用されている⁸²⁾。しかしながら、ボールエンドミルによる自由曲面加工において、例えばボールエンドミルの傾斜角度によるダウンカット、アップカット領域の存在範囲変化に起因する工具摩耗が工具寿命に与える影響など、いまだ未解明な現象が存在している⁸³⁾。さらにボールエンドミルは自由曲面の中粗加工や仕上げ加工において使用されることが多いため、材料除去率だけでなく被削材の最終の表面性状（例えば、仕上げ面粗さや光沢度）を考慮した切削条件や各種の加工法（主に等高線加工、走査線加工、面沿い加工など）の決定を行う必要がある。また、切削時の切り込み量や、被削材の様々な曲面形状によって、ボールエンドミル刃部の干渉領域が刻々と変化することにより、切削領域の予測が困難である。以上より、スクエアエンドミルに比べて条件決定の選択肢が増えることで、特に技能者の知識や経験といった技量がより一層必要となることから、一意的な切削条件や加工法の決定は困難であると考えられる。技能者が条件設定の指標として参照する工具カタログ推奨ボールエンドミル切削条件は、被削材形状による傾斜角度（エンドミル中心線と創成面法線がなす角度）や硬度、工具外径の観点から明確に分類されているため、そこには工具メーカーの有する暗黙知的な条件決定に関する知識や経験が隠されていることが予測できる。

これまで、ボールエンドミルの切削機構や長寿命化を実現できる工具経路生成、その形状設計、刃部摩耗予測モデルや切削面品位予測モデルの提案など⁸⁴⁾⁻⁸⁶⁾、ボールエンドミルに関連した様々な研究がなされてきたが、その切削条件決定支援において、複雑に関係する条件変数の組み合わせ問題に対してのシステム総合的な解を導出した報告は少ないようである。前章までにおいて、工具カタログに記載されているスクエアエンドミルの推奨切削条件や工具形状パラメータにデータマイニング手法を適用した。カタログマイニングでは対象とするデータ群に対して最初に非階層型クラスタリング手法である **K-means** 法を用いることで、エンドミルの工具形状の特徴に着目したクラスタ分けを行う。抽出された各クラスタに対して階層型クラスタリング手法を適用していくことで、各クラスタを構成するエンドミルの切削条件決定に有意となる傾向を抽出していく。そのため非階層クラスタリングの結果次第で、最終的に抽出される条件設定の傾向が異なり、それらに起因して導出される切削条件式の予測精度が変化する。ゆえに、カタログマイニングプロセスにおいては、**K-means** 法によって工具形状から適切にクラスタ分けを行う必要があり、対象とするエンドミルに対して

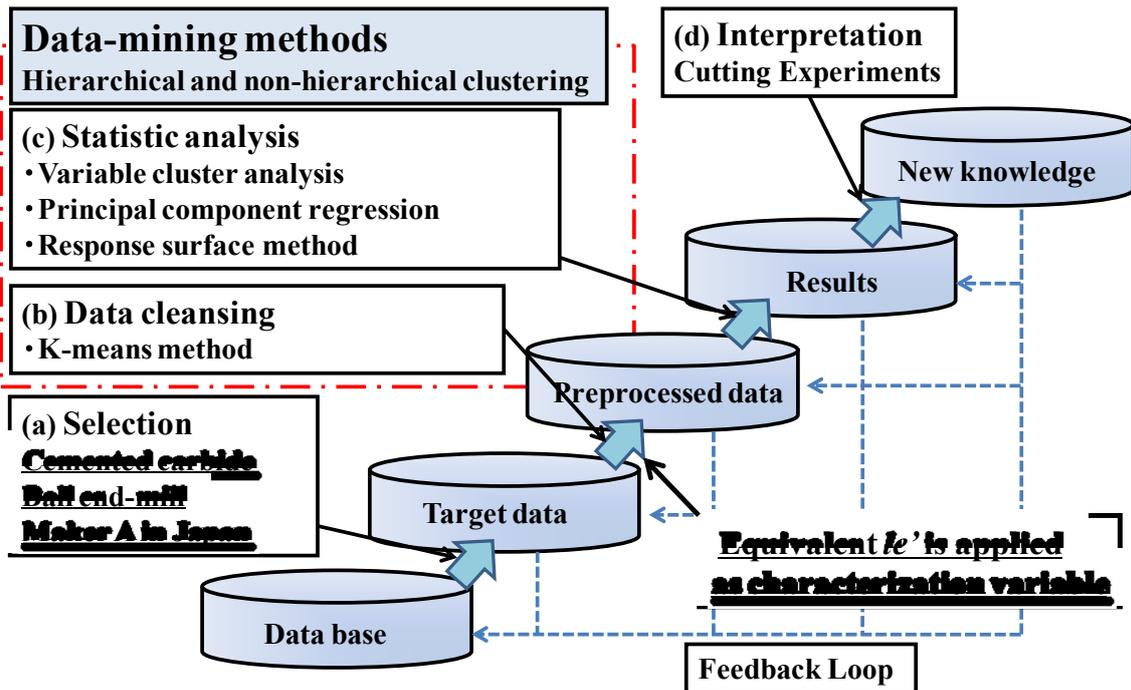


Fig. 7-1 Catalog mining process for ball end-milling

効果的に形状の特徴を表すことができる変数の設定が特に重要となることを明らかにしてきた。スクエアエンドミルでは、新たに工具形状の特徴を表す刃部の芯径（相当径 De mm）を導入することによって切削条件設定の特徴を効果的に抽出できることを解明し、エンドミル工具形状と被削材の硬さによって基準となる粗加工用の切削条件を迅速に決定できる支援システム（カタログマイニングシステム）を提案し⁶⁴⁾⁶⁵⁾、その有用性を切削実験により検証した⁶⁶⁾。しかしながら、中粗加工用のボールエンドミルに対する検討には至っていなかった。

そこで本章では、工具カタログに記載されているボールエンドミルのデータ群に対して、刃部に関する新たな変数（相当刃長 le' mm）を K-means 法において導入し、カタログマイニングシステムに適用することにより、特に中粗加工用ボールエンドミル切削条件決定に有意な変数の抽出およびその支援システムを提案する。また、切削条件決定式によって導出された切削条件の有用性を検証するために、直彫り用の金型鋼（DH31S 焼き入れ材硬さ $HRC53$ ）に対して、汎用工具を用いて被削材の傾斜角度を変えながら切削実験をおこなった。

7-2. カatalogマイニングプロセス

切削条件の決定を支援するために、提案するカタログマイニングプロセスを図7-1に示す。ターゲットデータ群がボールエンドミルに代わり、クラスタリングにおいて新たに相当刃長

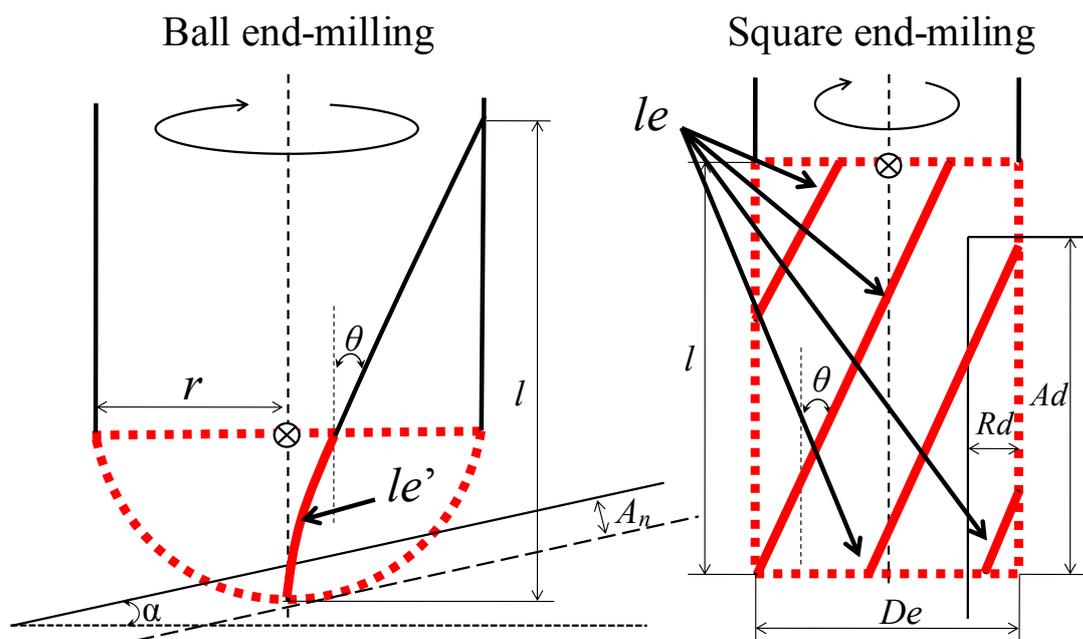


Fig. 7-2 Frame format of each processing

le' を導入した以外の、各手法の具体的な計算アルゴリズムは前章までに詳述しているため、本章ではそれらの概略を説明する。カタログマイニングプロセスにおいて、工具カタログに記載されている工具パラメータを説明変数として、その中で工具形状の特徴の抽出に非階層型、次に目的変数である切削条件の予測に線形関係で有意となるパラメータを階層型クラスタリング手法および主成分回帰を適用することにより抽出する。抽出された切削条件決定に有意な変数を用いて、前章で提案した応答曲面法により、切削条件決定式を導出した。導出したマイニング条件の有用性を検証するため、工具カタログに推奨切削条件の記載されていない金型材料に対して切削実験を行う。

7-2-1. スクエアおよびボールエンドミルの差異

図7-2の点線に示されるように、スクエアエンドミルにおいては軸方向切り込み量として、刃部全体の使用が想定され、当該部に対する新たな変数 De の導入が有効であった。また前章では、不等ピッチ・リードエンドミルに対して相当刃長 le を導入することにより効果的に工具形状によるクラスタリングができた。ボールエンドミルにおいては、創成面に対する法線方向切り込み量 (An mm) として、切れ刃の半球部分のみを使用することが多い。そのため、カタログマイニング初期段階での工具形状によるクラスタリングにおいて、工具形状の特徴を決定付ける変数として、切削に関与する刃部の正味の刃長を定義することによって、

スクエアエンドミルとの特徴づけの違いを明確にした。一般的に工具カタログ推奨条件は、スクエアエンドミルの場合は加工法の違い（側面加工 ($Rd < D$)、溝加工 ($Rd = D$)), ボールエンドミルであれば被削材傾斜角度 α の違いによる加工法の違いとして、両者共通して大きく2つに区別されている。これらの加工法や傾斜角度が相違することによって、工具の突き出し長さやホルダーの種類、それに伴う切削剛性の変化など、工具の寿命に影響を及ぼす様々な因子を考慮して切削条件を決定する必要がある。スクエアエンドミルを対象とした前章までにおいて、カタログ記載の被削材と工具の干渉関係として側面加工、溝加工を別々に扱うことで有意な知見を得ていた。そこで本章では、同様にカタログ記載の干渉関係として、工具の回転中心線に対する被削材の傾斜角 α の閾値 ($\alpha \leq 15^\circ$, $\alpha > 15^\circ$) に着目して別々にカタログ推奨切削条件を扱う。

7-2-2. K-means 法による属性抽出のための新たな変数の導入

まず非階層型クラスタリング手法を、工具カタログデータに適用し、工具形状によるクラスタ分けを行う。

データベースとして、工具カタログに記載されている、超合金製エンドミルを選択した。ターゲットデータとして、国内大手 A 社 2011-2012 年度版の工具カタログから、炭素鋼、合金鋼、焼き入れ鋼の切削に対する中粗加工用の工具カタログ推奨切削条件が記載されている超合金製ボールエンドミル（データ総数 986 項）を選択した。カタログマイニングシステムでは、工具カタログにのみ記載されている工具形状パラメータや、切削の安定性を判断する上で重要となる被削材の硬度、それぞれの被削材に対応したカタログ推奨切削条件を解析に使用している。そこで、カタログに記載されている、外径 D mm (0.1~20 mm)、刃長 l mm (0.2~38 mm)、全長 L mm (30~200 mm)、首下長さ l' mm (0.3~50 mm)、シャンク径 D_s mm (3~20 mm)、刃数 z (2, 3, 4)、ねじれ角 θ (0, 20, 30, 45°) などの形状データと対象とする被削材のロックウェル硬さ HRC (炭素鋼、合金鋼、焼き入れ鋼で 30~70)、工具標準価格 $PRICE$ yen (2590~124000 yen) を説明変数とした。予測対象となる目的変数はボールエンドミル切削条件（主軸回転数 S rpm, テーブル送り速度 F mm/min, 法線方向切り込み量 A_n mm, ピックフィード; 面内方向の切り込み量 P_f mm) とした。

図 7-3 にボールエンドミルの工具形状モデルを示す。一般的に、ボールエンドミルを用いる場合、図 7-2 の点線で示した刃部の半球部分を使用することが多い。そのため、K-means 法を適用する際のボールエンドミル工具形状の特徴を決定付ける変数として、切削に主に関

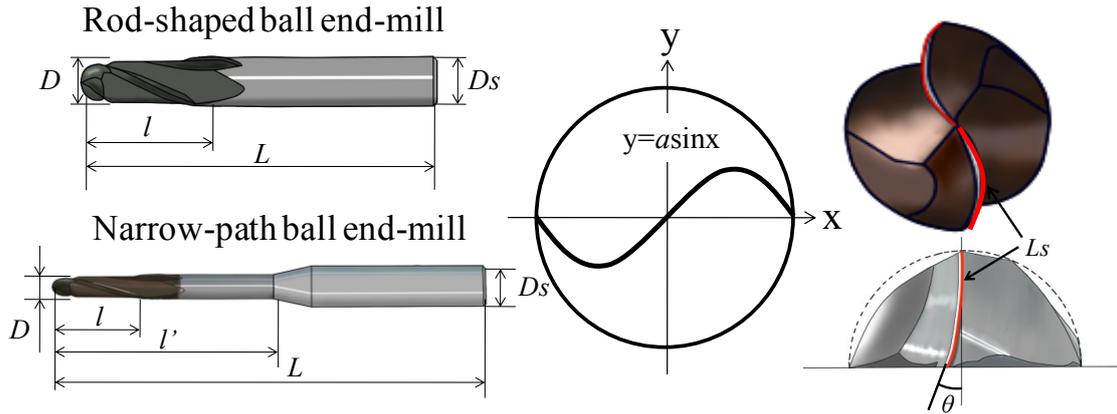


Fig. 7-3 Tool shape parameters

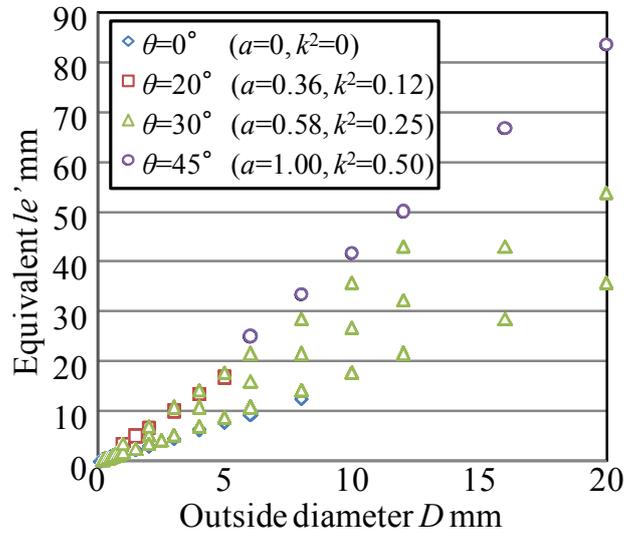


Fig. 7-4 Relationship between le' and D

与するエンドミル刃部における半球部分の形状に着目してクラスタリングを行うことによって、後のプロセスで各クラスタに階層型クラスタリング手法適用した際に、切削条件決定に有意な変数が効果的に抽出できると考えられる。また、ねじれ角を有する工具であっても、半球先端部の工具中心付近では切れ刃の実ねじれ角はゼロである。本章では図 7-3 に示すように、ボールエンドミル半球部分を構成するすべての刃の長さ L_s mm を算出後、外径補正した値に刃数を掛けた値として、ボールエンドミルの相当刃長 le' mm を定義する手法を新たに導入する。図 7-3 より、半球部分を構成する切れ刃曲線を x-y 平面上に投影し、 $f(x)=a\sin x$ の正弦波波形の半周期(a :振幅)で近似したとき、 $f(x)$ を $0 \leq x \leq \pi$ の範囲で線積分することによって得られる切れ刃長さを L_s と定義する。 L_s は式(7-1)であらわされる。

$$L_s = 2 \int_0^{\pi/2} \sqrt{1 + \{f'(x)\}^2} dx = 2\sqrt{1+a^2} \int_0^{\pi/2} \sqrt{1-k^2 \sin^2 x} dx \quad (7-1)$$

ここで、 $k^2 = a^2/(1+a^2)$ は離心率を表す。ボールエンドミルの場合、 $x=\pi$ の位置において工

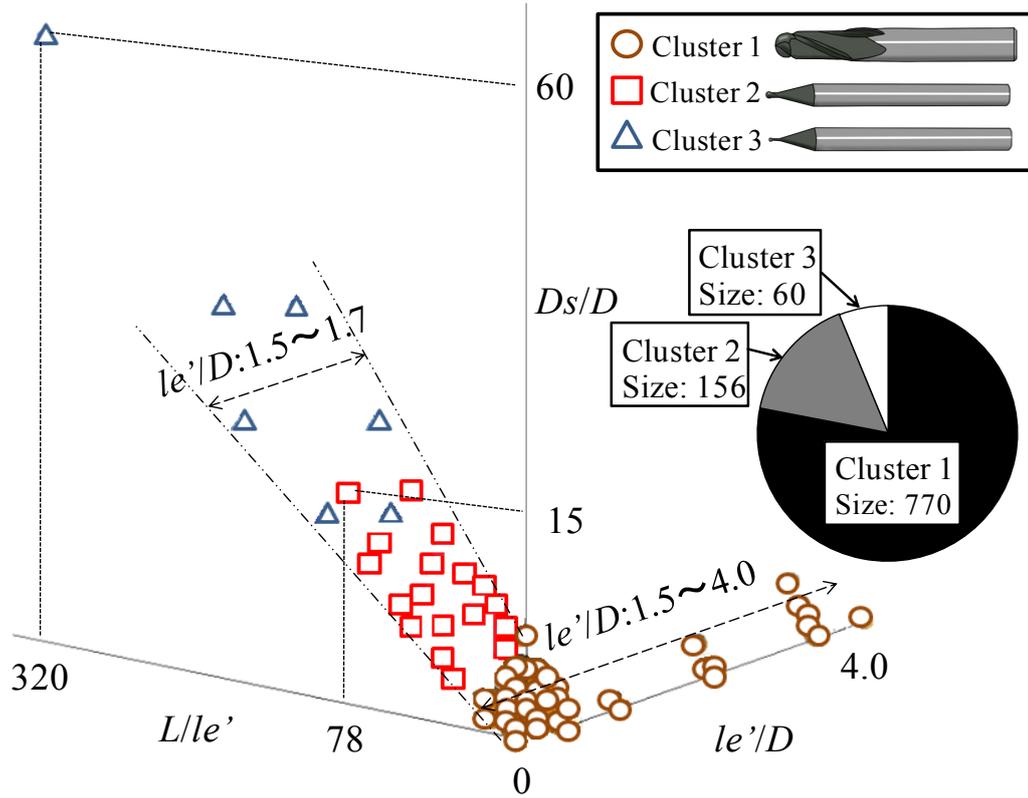


Fig. 7-5 Result of K-means method

具の中心軸と刃のなす角度が工具ねじれ角 θ に相当すると考えられる。つまり図 7-3 より、ねじれ角 θ は $\tan \theta = f'(x)|_{x=\pi} = -a$ によって定義できる。このとき $a^2 = \tan^2 \theta$ となる。算出された L_s と、工具外径 $D_{10, 12, 16}$ のボールエンドミルで実際に計測した切れ刃長さとの誤差を補償するため、 D で構成される補正係数を導出した。その結果、 le' は式(7-2)によって算出できる。

$$le' = z \left\{ 0.5D\sqrt{1+a^2} \int_0^{\pi/2} \sqrt{1-k^2 \sin^2 x} dx + 0.0074D \right\} \quad (7-2)$$

D と le' の関係を示した図 7-4 より、 le' と D は線形関係を示していることがわかる。また、 θ や z が大きくなるほど同じ D 値であっても、 le' 値は大きくなっていく。 le' の導入によって、工具先端部を構成する切れ刃形状の特徴を定量的に表現できるものと考えられる。

7-2-3. K-means 法による非階層クラスタリング結果と考察

K-means 法を用いた工具形状によるクラスタリングを行うための変数として、 L/le' 、 le'/D 、 D_s/D の無次元の 3 変数を選択することによって、工具モデルにおけるボールエンドミルの概形と刃部の特徴が決定できる。 L/le' は工具全体の長さに対する切削関与部分の占める割合

を示し、 L/le' が大きいほど、工具は小径となる。 le'/D は切削関与部分に対する工具外径の大きさの割合を示し、 le'/D が大きいほど工具の刃数が多くなる。 Ds/D は工具のシャンク径に対する工具外径の割合を示し、小径工具と他の汎用工具をクラスタ分け可能である。また、工具カタログ記載のボールエンドミルは、用途によって3つの形状に大きく分類できている。すなわち、①段付きのない汎用ボールエンドミル ($Ds/D=1$)、②ロングネック形状のボールエンドミル (比較的 L/le' が大)、③小径ボールエンドミル (比較的 L/le' が大、 Ds/D が大)。そのため、K-means法によって分類すべき非階層クラスタの数を3に設定した。K-means法において、クラスタ間の距離計算にはマンハッタン距離を用いた⁷⁾⁸⁾。

上記3変数により、K-means法によってクラスタ分けを行い、得られた各変数の関係を図7-5に示す。図7-5より、クラスタ1は、主に段付きのない汎用ボールエンドミルおよび少数のロングネック形状ボールエンドミル ($1.0 < D \leq 20$)によって構成されている。クラスタ2, 3は主に小径エンドミルおよびロングネック形状ボールエンドミル ($0.1 \leq D \leq 1.0$)によって構成されている。すなわち段付きのない形状をした汎用エンドミルが多数を占めていることがわかる。図7-5より、各クラスタの境界がほぼ明確に表れていることから、相当刃長を定義した工具形状の特徴を表す変数選択および、クラスタ数は妥当であることもわかった。さらに工具カタログにおいて、推奨切削条件は、傾斜角度 α が $\alpha \leq 15^\circ$ 、 $\alpha > 15^\circ$ の2つの場合に区別されている。そのため、各非階層クラスタは自動的に $\alpha \leq 15^\circ$ 、 $\alpha > 15^\circ$ という2つの属性(加工法の違い)を有し、工具カタログ全体で合計で6つの非階層クラスタが抽出できた。以後、これらをクラスタ1~3 ($\alpha \leq 15^\circ$ 、 $\alpha > 15^\circ$)とする。

7-2-4. 非階層クラスタ内の有意な変数の選択手法

前節までの変数選択手法と同様に、各クラスタにおいて、傾斜角度 α によって抽出された各属性に対して、階層的クラスタリング手法である変数クラスタ分析および主成分回帰手法²⁾により、目的変数(工具カタログ推奨切削条件)と線形的な相関関係のある説明変数(工具形状パラメータ)を選択する。変数クラスタ分析によって出力される樹形図を用いて、クラスタ間の融合の順序とその類似度(説明変数間の相関関係)がビジュアル化できる。クラスタ間の距離計算はワード法を用いた⁷⁾⁸⁾。1章にて、工具カタログスクエアエンドミルデータに各種の距離計算手法を適用した場合、ワード法が最も分類感度が良く、データの構造が把握しやすいことが判明している。また、主成分回帰手法によって、目的変数に対する説明変数が有する影響度合いを、主成分回帰係数(C_p 値)により定量的に算出できる。最

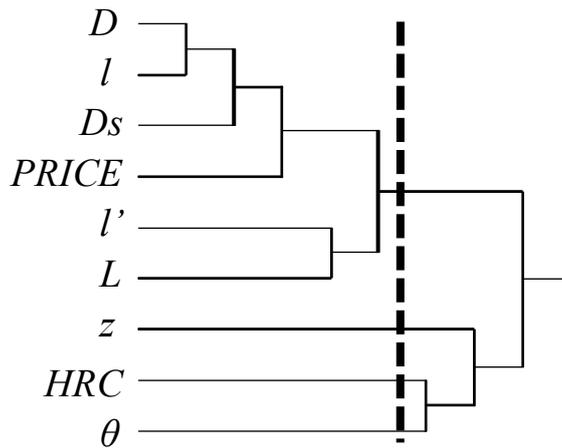


Fig. 7-6 Tree diagram of Cluster 1

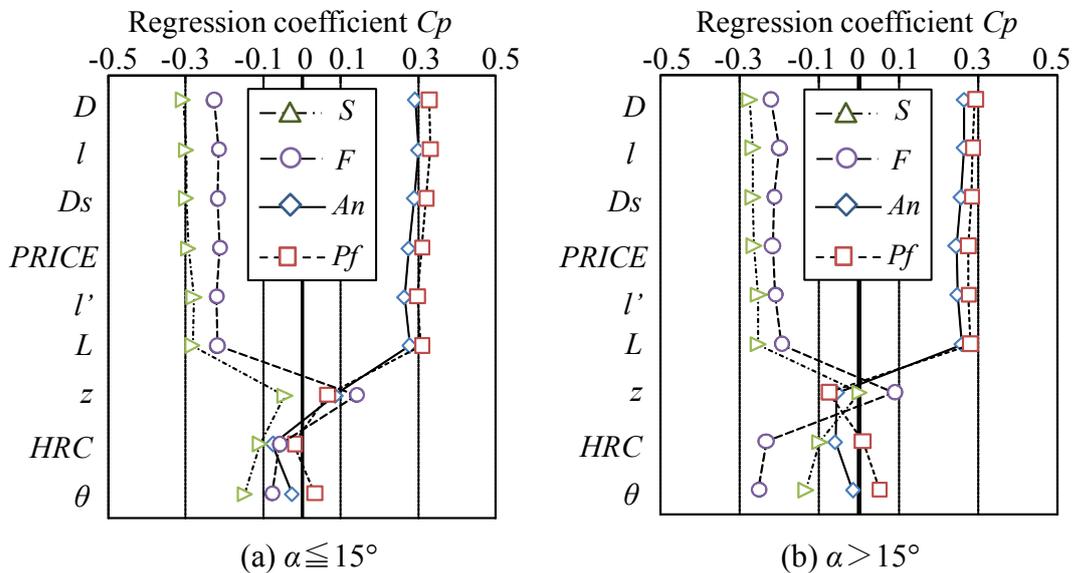


Fig. 7-7 Results of principal components regression of Cluster 1

最終的に、両者の結果を比較検討しながら、式を構成する有意な説明変数を選択する。

図 7-6 に例として、クラスタ 1 ($\alpha \leq 15^\circ$, $\alpha > 15^\circ$) について変数クラスタ分析によって得られた階層型クラスタの樹形図を示す。図 7-7 に例として、クラスタ 1 について主成分回帰によって得られた主成分回帰係数を示す。階層型は樹形図におけるカッティング線の位置によってクラスタ数が異なる。図 7-6 に表すカッティング線（図中の破線）によって各変数を 4 つの階層クラスタに分割する。切削条件決定式を構成する説明変数の数は、人間の空間認知能力は 3 次元までを限界とする特徴を工学的に応用する⁷⁾ ことによって、3 つ以内とする。そのため、樹形図中のカッティング線は階層クラスタの数が少なくとも 3 つ得られる位置に配置する必要がある。このように、解析の目的に合わせてカッティング線を配置することによ

り、階層クラスタの数を調整することができる。分割した各階層クラスタを構成する変数について、より左側で変数同士が縦線によって連結されているほど、変数間の相関関係は強いことがわかる。

クラスタ1において、樹形図のカッティング線より、説明変数は ($D, l, D_s, PRICE, l', L, z, HRC$ および θ の4つの変数で階層クラスタに分類できる。この時点で、クラスタ1の両属性、すなわち $\alpha \leq 15^\circ$, $\alpha > 15^\circ$ の切削条件決定式に用いる有意変数として、 z, HRC, θ は採用される。次に図7-7の主成分回帰係数より、上記6つの変数で構成されるグループについて、各目的変数でより相関関係の強い (C_p 値の絶対値が大きい) 変数を選択していく。例えば、目的変数が S の場合、上記6つの変数の中では D が最も負の相関が強い ($C_p -0.3$) ことがわかる。そのため、上記6つの変数の中では D を採用し、他の変数は棄却する。つまり、クラスタ1の工具に対して、すべての切削条件決定に有意な変数として、 D, z, θ, HRC が選択された。このようにして、クラスタ1, 2, 3の各属性に対して、ボールエンドミル切削条件決定に有意となる変数を選択していく。

7-2-5. 応答曲面法による切削条件決定式の導出と考察

前節の手法で選択された有意変数を用いて、実用的な最適化手法である応答曲面法により、3変数2次の切削条件決定式を導出する。前節までに述べたように、ボールエンドミルは幾何学的な複雑さを有するため、前章と同様に2次多項式を用いた。例として、クラスタ1の各属性において、選択された有意変数を用いて導出された切削条件決定式を式(7-3)~(7-10)に示す。

① $\alpha \leq 15^\circ$ の場合

$$A_n(R_{ad}^2 0.69) = 3.8z + 0.010D \cdot z - 0.031z \cdot \theta + 0.0018D^2 - 0.50z^2 + 0.0021\theta^2 - 5.6 \quad (7-3)$$

$$Pf(R_{ad}^2 0.77) = 7.7z + 0.011D \cdot z - 0.054z \cdot \theta + 0.0010D \cdot \theta + 0.0062D^2 - 1.05z^2 + 0.0038\theta^2 - 11 \quad (7-4)$$

$$S(R_{ad}^2 0.90) = -6257D + 860HRC + 544\theta - 15HRC - 5HRC \cdot \theta - 179D^2 - 11HRC^2 - 7\theta^2 + 29759 \quad (7-5)$$

$$F(R_{ad}^2 0.52) = -674D + 253\theta + 84D \cdot z - 96z \cdot \theta + 10D^2 + 459z^2 + 3737 \quad (7-6)$$

② $\alpha > 15^\circ$ の場合

$$A_n(R_{ad}^2 0.54) = -0.019\theta - 0.011D \cdot z + 0.0019D \cdot \theta - 0.020z \cdot \theta + 0.00065D^2 + 0.10z^2 + 0.0018\theta^2 - 0.21 \quad (7-7)$$

$$Pf(R_{ad}^2 0.65) = -3.8z - 0.063\theta - 0.047D \cdot z + 0.0063D \cdot \theta + 0.0032D^2 + 0.66z^2 + 0.0015\theta^2 + 5.41 \quad (7-8)$$

$$S (R_{ad}^2 0.84) = -4988D + 1562HRC + 2074\theta - 36HRC \cdot \theta - 53D \cdot \theta + 25D \cdot HRC + 187D^2 - 9HRC^2 - 22329 \quad (7-9)$$

$$F (R_{ad}^2 0.67) = -437D + 251HRC + 276\theta + 3D \cdot HRC - 4HRC \cdot \theta + 8D^2 - 2HRC^2 - \theta^2 - 4045 \quad (7-10)$$

導出された応答曲面近似式の予測精度の判断には前章と同様に、単位自由度あたりの残差を比較する必要がある、一般的には自由度修正済み決定係数 R_{ad}^2 が用いられる¹⁰⁾。式を構成する各変数は回帰係数の t 検定の有意性により選択する。この t 検定によって、回帰式への寄与度が低い係数を棄却し、より R_{ad}^2 の高い近似式にする。例えばクラスタ 1 では式の導出に有意な変数として D , z , θ , HRC が採用されているが、t 検定の有意性判断によって、各目的変数に対して 3 変数以下となるように選択を行った。

7-2-6. カタログ推奨値とマイニング導出式の関係

工具カタログが推奨する切削条件は一般的に、工具メーカーが実験計画法等を用いた試行錯誤的な切削実験によって、基準を満足する工具寿命や切削除去率を達成できる切削条件を探索し、それをカタログ推奨条件として提案されていることが多い。そのため、ユーザ側は所有する工作機械やホルダーの剛性、工具付き出し量、クランプ方法、切削にかかるコストや納期等の要因によって、カタログ推奨条件を基準としてさらに最適な条件を考えることが必要な場合が多い。そのため、導出式の値がカタログ推奨条件と同値である場合以外に、ある程度の幅を考慮して有効な切削条件を示す必要がある。すなわち本研究において、導出式の精度は単に R_{ad}^2 の大小でなく、カタログ推奨値に対する比率に知識としての意味がある。

工具カタログ推奨条件は工具メーカーが試行錯誤の切削実験によって導出した結果であり、多くの技術者はこの条件を切削の目安として使用することが多い。一般的に、カタログ推奨条件を機械の性能による制約や、技術的に切削の安定性を確保できない場合などにおいて、工具カタログにおいては、カタログ推奨条件を基準にしてその下げ幅として下限 60%ほどの値で用いることが規定されている。また工具カタログ推奨条件を用いてボールエンドミルを使用する機会の多い技術者（ユーザ）にリサーチしたところ、カタログ推奨条件が推奨する切削能率以上の能率を必要とする場合は、カタログ推奨条件を基準にしてその上げ幅として上限 140%ほどの値が平均的に多数で用いることがわかっている。そこで図 7-8 に、例としてクラスタ 1 の各条件変数 (S, F, An, Pf) に関して上記の切削条件域を考慮し、式(7-3)~(7-10)の導出式の値（マイニング推奨条件）とカタログ推奨条件の関係を示した。図中の点線枠内に存在する条件は、実用可能な切削条件であると考えられる。各条件変数 (S, F, An, Pf)

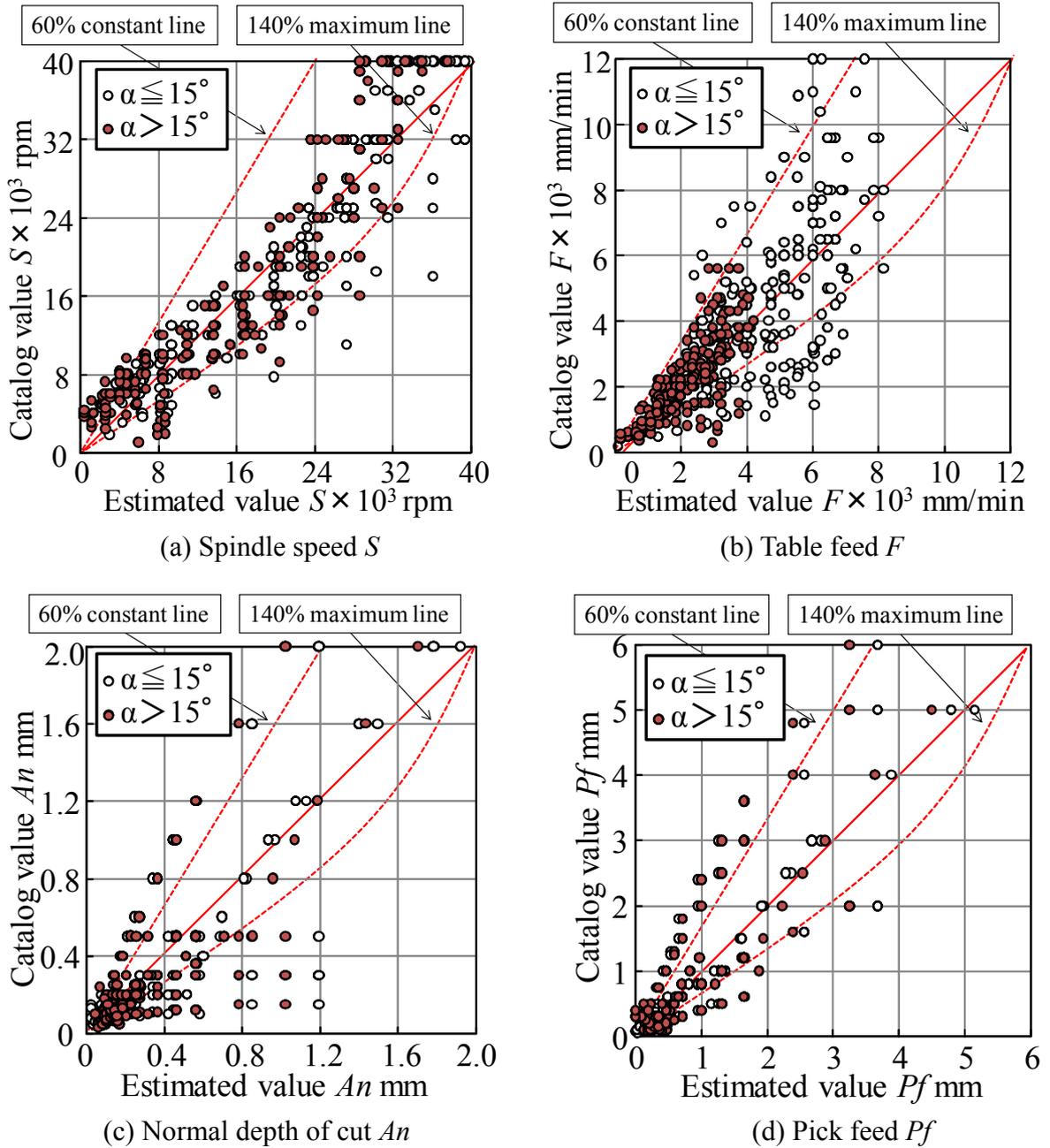


Fig. 7-8 Relationship between estimated and catalog value of Cluster 1

について、全データのうち、実用可能な切削条件はそれぞれ、90、60、80、80%を占めている。 S に比べて、 F のマイニング条件の導出範囲が $\alpha \leq 15^\circ$ の条件では 8000 mm/min 以内、 $\alpha > 15^\circ$ の条件では 4000 mm/min 以内と狭いことがわかる。 F においては、カタログ推奨値の大半は上記送り速度を推奨しており、マイニングの結果は事実を反映して、上記の送り速度帯域を推奨するという結果が得られたことがわかる。傾斜角度が大きくなる場合、すなわち $\alpha > 15^\circ$ において工具カタログは F を低めに推奨していることがわかり、従来の切削条件決定において自明であった知見をカタログマイニングによって工具カタログからも実証できた。

Table 7-1. Ball end-milling conditions

α	$\leq 15^\circ$	$> 15^\circ$
S rpm	13000	9177
F mm/min	3500	1953
An mm	0.30	0.36
Pf mm	0.90	1.00
MRR cc/min	0.99	0.74
Ryt μm	25.3	31.2

これらの傾向は他社工具メーカーのカatalogマイニング結果からも同様にみられる。 An , Pf などの切り込み量の因子は、カatalogにおいて D の定数倍で関連付けられている場合が多いため、スクエアエンドミルを対象とした1章、2章、3章と同様に、他の速度の因子をもつ条件変数に比べて条件式の予測精度は良い傾向にあった。

7-3. ケーススタディ

7-3-1. 使用した切削条件および工具、被削材料

本章の手法によって導出された切削条件の有用性を検証するため、標準的に多用する機会の多いクラスタ1に属する段付き形状のない超硬合金ボールエンドミル（工具直径8mm、2枚刃、ねじれ角 30° 、TiAlNコート）を対象として、焼き入れしたDH31S材（HRC53）の切削実験を行った。DH31SはJIS SKD61およびSKD7の両特性を兼ね備えた強度と靱性のバランスに富む熱間金型鋼であり、本章で対象とした工具カatalog上ではDH31Sの推奨切削条件は記載されていない。そのため、被削材硬さHRCにDH31Sの硬さ（HRC53）を代入することにより、マイニング条件を導出した。被削材の傾斜角 $\alpha \leq 15^\circ$ 、 $\alpha > 15^\circ$ の場合について、それぞれの条件を表7-1に示す。また条件変数の組み合わせ結果を評価する指標としてMRRに注目する。MRR cc/minは $MRR = An \cdot Pf \cdot F / 1000$ によって導出される1パスあたりの材料除去率の目安である。またピックフィード方向の幾何学的理論粗さ Ryt μm は $Ryt = Pf^2 / 4D$ によって定義される。カatalog推奨条件は中粗加工を想定しているので、導出されたマイニング条件は材料除去率はできるだけ高く、加工後の表面性状は後の工程の取りしろに影響しない程度に幾何学的理論粗さに近い値が得られることが望ましい。図7-8(b)の傾向どおり、表7-1中で最も特徴的なのは $\alpha \leq 15^\circ$ と $\alpha > 15^\circ$ の F の差である。また表7-1よりマイニング条件は図7-8の枠線内に存在しており、実用可能な切削条件であることが予測される。

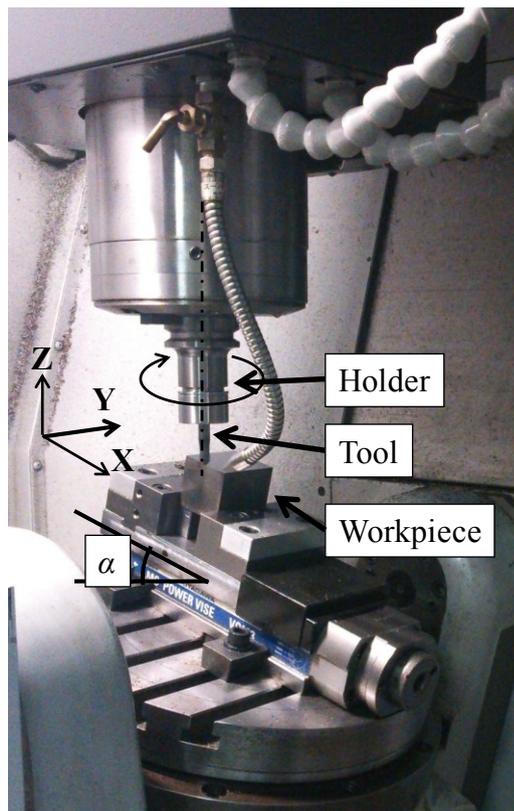
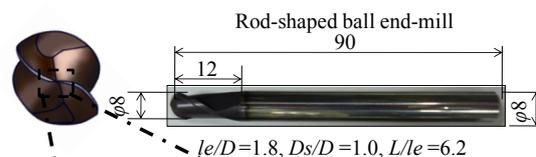
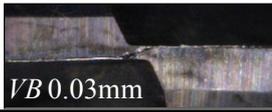
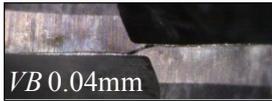
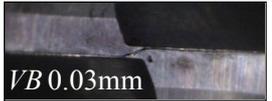
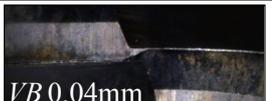


Fig. 7-9 Experimental set up

Table 7-2. Experimental results



	VB abrasion width	Chip shape
$\alpha=0^\circ$ 0.2 mm	 VB 0.03mm	
$\alpha=5^\circ$	 VB 0.04mm	
$\alpha=15^\circ$ ($\alpha \leq 15^\circ$ condition)	 VB 0.05mm	
$\alpha=15^\circ$ ($\alpha > 15^\circ$ condition)	 VB 0.03mm	
$\alpha=30^\circ$	 VB 0.04mm	

7-3-2. 実験方法

図 7-9 に示す 5 軸制御マシニングセンタである SuperMILLER400 (森精機製作所製, 主軸テーパ BT-40 番/最高主軸回転数 20,000 rpm) を旋回軸傾斜させることによって $\alpha = 0, 5, 15, 30^\circ$ の傾斜角度で y 軸方向に送りを与える等高線加工を行った. BT40 (プルスタッド型番: P40T-1) の工作機械のため, 工具ホルダーはスプリングコレットタイプである BBT40-MEGA16N-90 (大昭和精機製) にてエンドミルを保持した. 工具の突き出し長さ L は $L/D=4$ とした. 工具振れは $5\mu\text{m}$ 以下で切削を行った. カタログの傾斜角境界値 ($\alpha=15^\circ$) に対しては, $\alpha \leq 15^\circ$, $\alpha > 15^\circ$ の両属性で導出された条件を用いて切削した. クーラントはドライエアーとした. 切削は, 工具メーカーがテーラーの工具寿命式を参考に推奨する標準切削時間である 15 分間を, 正味の切削距離に換算して行った. また, 加工後の仕上げ面粗さは触針式粗さ測定機によってピックフィード方向に 5 回測定し, その平均値をとった.

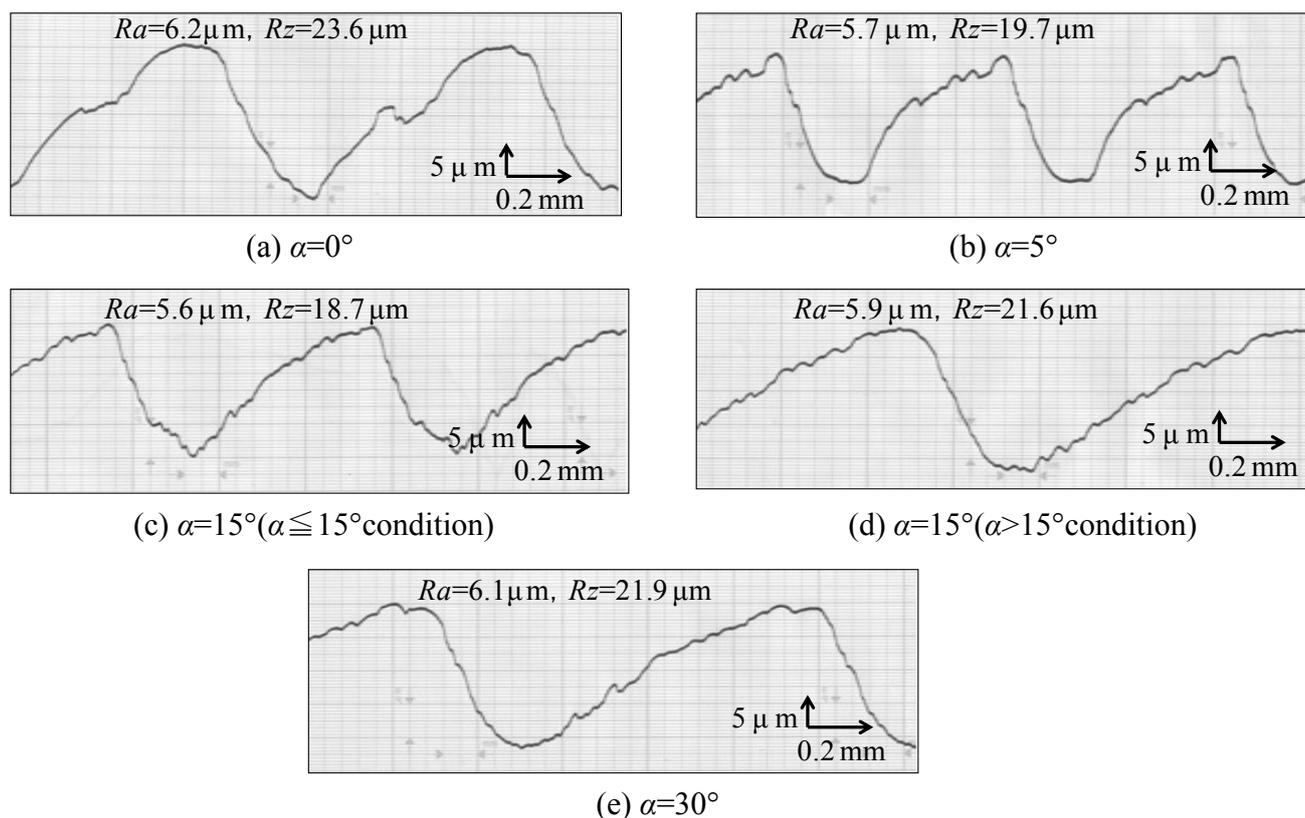


Fig. 7-10 Roughness curve (Stepped down, Up cut)

7-3-3. 実験結果と考察

15 分間切削後の工具逃げ面摩耗写真および摩耗幅 (VB mm), 切りくず形状を表 7-2 に示す. 最大逃げ面摩耗幅が 0.2 mm に達したときを寿命とした. 表 7-2 より, 15 分間では各条件で定常的に摩耗が進行していることがわかる. 切削初期と切削後の切りくずの色の変化や, 切りくず端面のむしれやばりも発生しなかった. すべてのマイニング条件において, 15 分間切削では寿命に達しておらず, ほぼ実用範囲内にあることが示された.

図 7-10 にそれぞれの条件についての 15 分間切削後の粗さ曲線を示す. 図 7-10 より, すべての切削条件でむしれの発生が少なく, 明瞭なピックフィードによるツールマークが確認できる. また, Ra , Rz とともに表 7-1 中に示す Ryt よりも小さな値を示している. 15 分間切削後の加工面性状は工具先端部分が切削に関与している場合, 先端部分の実切削速度は工具送り速度と等しくなることによって, 構成刃先の発生により加工面にむしれが生じてしまい, 加工面性状は悪化することが一般的に知られているが, 先端部分が関与する $\alpha = 0, 5, 15$ の条件下での表面性状から, それらの発生はなく加工面性状の良好な安定した切削が行えたことがわかる. 図 7-8 より, マイニング推奨条件はカタログ推奨条件に対して 60%の枠線内

付近に分布している。すなわち、段付き形状のない汎用工具に対して、導出されたマイニング条件が図 7-8 の枠線内に分布していれば、マイニング条件はある程度、実用的であることがわかった。式(7-3)~(7-10)に工具パラメータを代入することによって、工具カタログに推奨切削条件が記載されていない金型加工用の被削材料であっても、指標となる切削条件決定のための試行錯誤的な実験を行うことなく、ある程度実用的な切削条件を迅速に導出できる。

以上より、カタログマイニングによって導出されるボールエンドミル中粗加工用切削条件は、非熟練技能者や技術者にとって基準となる切削条件として有効であることが示せた。

7-4. 結言

工具カタログデータの複雑な組み合わせで決定されるボールエンドミルの条件設定に対して、非階層・階層クラスタリング手法を組み合わせたカタログマイニング手法を適用し、ボールエンドミルの切削条件の決定に関して考察した結果、以下の結論を得た。

- (1) 非階層クラスタリングにおいて、新たにエンドミルボール部 (R 部) の特徴を定量化する相当刃長 le' を導入することで、切削条件決定の導出式に有意なクラスタを導くことができる。
- (2) カタログ推奨値と 2 次の応答曲面を用いた導出式の値 (マイニング推奨条件値) を比較することで、切削条件の変数間において、使用可能な変数の範囲の目安を明確化できる。
- (3) カタログマイニングシステムによって工具カタログデータから抽出された切削条件決定に有意な変数で構成される切削条件決定式を用いることによって、カタログに記載されていない推奨条件が未知の材料でも、迅速かつ効率的に実用的な切削条件の導出が可能であることを示した。

第 8 章 結 論

本章では、これまで述べてきた各章の結言の要点をまとめ、本研究によって得られた成果を明確化している。

本論文では、非熟練技能者を対象に切削条件や使用工具形状（直径，全長，刃長，刃数）の選定を支援するために、工具カタログデータに、階層・非階層型のクラスタリング手法を適用することで、切削条件決定を支援できるシステムの提案を行った。また、これらのデータマイニングプロセスにおいて新知識の発掘を目的とする。非階層型のクラスタリング手法である K-means 法によって工具カタログから形状ごとにクラスタ分けし、その各形状クラスタに対して、変数クラスタ分析によって有意な変数を選択し、分析した結果に基づいて切削条件を決定できる実用式を導出して考察した。

第 2 章から第 7 章までに得られた結果を総括すると以下ようになる。

第 2 章では、工具カタログデータに対して、工具カタログデータに対して、非階層・階層クラスタリング手法を組み合わせたデータマイニング手法を適用し、切削条件を導出できるシステムについて考察した。特に非階層クラスタリングである K-means 法において、スクエアエンドミル刃部の工具形状を表すパラメータとして、相当径 D_e を導入する手法を開発した。その結果、非熟練技能者を支援できるシステムとして、工具カタログデータに非階層・階層クラスタリング手法を適用することは、切削の初期段階で目安となる切削条件の導出に有効であることがわかった。

第 3 章では、データマイニング手法の中で、新しいクレンジングの 1 つとして切削条件決定の際に自明であると考えられる変数を固定（工具外径 D を $\phi 10$ ）する手法を試みた。すなわち、ラジラスエンドミルの切削条件決定に新しいクレンジング手法を適用した。その結果、自明な変数を説明変数から除外するデータクレンジング手法により、切削工具メーカーごとの切削条件設定の特徴を抽出することが容易となることがわかった。また、目的変数の中で、速度の次元を有する変数が重要で、その中でもとくに切削速度の導出が困難であり、切削条件決定において重要になることがわかった。一方で、カタログマイニングにより導出された切削条件決定式は単にカタログ値を予測する精度が重要ではなく、工具寿命重視または加工能率重視など、切削条件を変更しようとする際に重要な指針となることがわかった。さらにその目安を示す可視化線図を提案できた。

第 4 章では、提案する手法により、金型鋼の高速粗加工に適したラジラスエンドミルの切削条件を導出した。導出されたマイニング条件とカタログ条件、エキスパート条件（複数名の熟練技能者の試行錯誤的な現場の実験によって導かれた条件）について、材料除去率と加工面粗さの観点から比較検証した結果、カタログマイニングシステムによって導出された粗加工用切削条件は、最適な切削条件決定に至るまでの指標として実用的であることがわかった。

第 5 章では、カタログマイニングによって導出された切削条件決定式の特徴を考察するため、工具寿命実験、消費電力測定実験を行い、その実験結果から環境への影響を定量的に評価する手法である LCA を用い、本システムの有効性を検討した。従来は考慮されることのなかった工具の消耗に起因する環境負荷を考察した。その結果、累積環境負荷の低減を目的とした最適条件は実験計画法により得られることができた。また、切削効率 MRR が大きくなるほど寿命係数 T_c は大きくなり、消費電力量は小さくなった。累積環境負荷を抑えるには工具に起因する環境負荷を抑えることが重要であり、加えて工作機械の消費電力量も考慮する必要があることがわかった。さらに習熟曲線を考慮することにより、マイニング条件を用いることで初期段階の時間や工具、電力消費を削減できる有効性が示された。また、カタログには正確に切削条件が記載されていない溝加工においては、マイニング条件を用いることで明確な切削条件を得ることもできた。

第 6 章では、難削材加工用の工具カタログに対して、カタログマイニング手法を適用することにより、切削条件決定式の導出を行い、切削温度のモニタリングの観点から、マイニング条件の有用性を評価した。また不等リード・ピッチエンドミルを考慮するための新たな変数として、刃のねじれ角の差に着目した有効刃長 le を非階層クラスタリングに導入しカタログマイニングを遂行した。さらに、切削条件決定式の導出に 2 次の応答曲面法を適用することによって、速度成分因子である切削速度や送り量の条件式の精度が向上できた。その結果、相当刃長 le を K-means 法において導入することにより、効果的に不等ピッチ・リードエンドミルと汎用エンドミルをクラスタ分けすることが可能になった。他社の工具カタログにおいても、提案する手法の有用性を示せたことから、その提案手法の一般性を確認できた。また切削速度に関しても予測的に 2 次の応答曲面法を用いることで、各難削材ごとに加工法の違いを考慮した、指針となるシステム総合的な切削条件を定量化できた。また切削時の温度を赤外線サーモグラフィを用いて計測した結果、導出されたマイニング条件は、技術者が提案する標準条件とほぼ同程度の切削温度であり、ある程度指標となる実用的な切削条件で

あることがわかった。

第 7 章では、工具カタログデータの複雑な組み合わせで決定されるボールエンドミルの条件設定に対して考察した。その結果、非階層クラスタリングにおいて、新たにエンドミルボール部 (R 部) の特徴を定量化する相当刃長 le' を導入することで、切削条件決定の導出式に有意なクラスタを導くことができることがわかった。カタログ推奨値と導出式の値 (マイニング推奨条件値) を比較することで、切削条件の変数間において、使用可能な変数の範囲の目安を明確化できた。カタログマイニングシステムによって工具カタログデータから抽出された切削条件決定に有意な変数で構成される切削条件決定式を用いることによって、カタログに記載されていない推奨条件が未知の材料でも、迅速かつ効率的に実用的な切削条件の導出が可能となった。

データマイニング手法をものづくりの現場に適用するために、生産現場で容易に入手可能な膨大なデータベースとして工具カタログデータに着目した。工具カタログは毎年工具メーカーによりデータベースが更新されるだけでなく、工具メーカーの技術者の加工に関する知識も潜む良質なデータベースと考えられるからである。特にエンドミル工具に対してデータマイニング手法を適用するためのカタログマイニング手法を適用した。本手法を用いることで、金型加工の工程設計において粗加工から中粗加工までを内包した、非熟練技能者にとって指針となるスクエアエンドミルおよびボールエンドミルの切削条件の導出が可能となった。スクエアエンドミルを対象とした粗加工においては、カタログマイニングによって導出される推奨条件を用いることにより、切削の初期段階で行われる試行錯誤的な実験を削減できるため、環境影響負荷を低減することが可能になることが示せた。またカタログマイニングの結果、金型鋼以外にも、超耐熱合金などに代表される難削材料に関して、切削の初期段階で実用的な切削条件の導出が可能となることが示せた。本研究の成果により、刃部形状やコーティング、加工目的が多岐にわたる超硬エンドミルの切削条件決定が体系化されることにより、日本の生産を支える根幹となる中小企業や町工場の技能者が切削条件を決定する際のコストや時間の低減につながる。製造現場の抱える、従業者の高齢化、後継者不足、販売価格の低下やそれに起因する産業構造の弱体化など、数々の課題を解決できると考えられる。日本的なものづくりをサステナブルに実現するためには、本研究の提案する仕組みが必要であり、日本の製造業が息を吹き返すと考える。デジタル化が進む社会でデータを有効に活用することの効果認められることで、製造現場にデータマイニングを適用する研究が、世界的に今よりも発展していくことが期待される。

参考文献

- (1) 後藤光宏, 切削加工の技術動向と将来展望, 砥粒加工学会誌, 56, 1, (2012), pp.3-6.
- (2) 成田浩久, 環境負荷を最小化する切削条件の決定方法, 日本機械学会誌, 115, 1120, (2012), p.180.
- (3) Lee, M. H., Knowledge Based Factory, *Artificial Intelligence in Engineering*, 8, (1993), pp. 109-125.
- (4) Irani, K. B., Cheng, J., Fayyad, U. M., and Qian, Z., Applying Machine Learning to Semiconductor Manufacturing, *IEEE Expert*, 8, 1, (1993), pp. 41-47.
- (5) Piatetsky-Shapiro, G., The Data Mining Industry Coming of Age, 14, 6, pp. 32-34.
- (6) Adachi, T., Talavage, J. J., and Modie, C. L., A Rule Based Control Method for a Multi Loop Production System, *Artificial Intelligence in Engineering*, 4, 3, (1989), pp. 115-125.
- (7) Whitehall. B. L., Lu, S. C. Y., and Stepp, R. E., CAQ: A Machine Learning Tool for Engineering, *Artificial Intelligence in Engineering*, 5, 4, (1990), pp. 189-198.
- (8) Gardner, M., and Bieker, J., Data Mining Solves Tough Semi Conductor Problems, *KDD 2000 in Boston*, (2000), pp. 376-383.
- (9) Sebzalli, Y. M., and Wang, X. Z., Knowledge Discovery from Process Operational Data Using PCA and Fuzzy Clustering, *Engineering Application in Artificial Intelligence*, 14, (2001), pp. 607-616.
- (10) 津本周作, 平野章二, 複合医工学としてのデータマイニング, 人工知能学会誌, 22, 2, (2007), pp.201-207.
- (11) 高橋由雅, 藤島悟志, 加藤博明, 化学物質の構造類似性にもとづくデータマイニング, 日本コンピュータ化学会, 2, 4, (2003), pp.119-126.
- (12) 藤島悟志, 高橋由雅, 化学構造データマイニングのための TFS ピーク同定システムの開発, 日本コンピュータ化学会, 3, 2, (2004), pp. 49-58.
- (13) 羽室行信, 中元政一, 森田裕之, 離散構造データのデータマイニングツール開発とその応用, 人工知能学会誌, 27, 3, (2012), pp. 261-270.
- (14) Michael, J. S., Chandrasekar, S., Gek, W. T., and Michael, E. W., Knowledge Management and Data Mining for Marketing, *Decision Support Systems*, 31, (2001), pp. 127-137.
- (15) Christine, G., and Alan, D., Knowledge Discovery from Industrial Database, *Journal of Intelligent Manufacturing*, 15, (2004), pp. 29-37.
- (16) Natarajan, U., Periasamy, V. M., and Saravanan, R., Application of Particle Swarm Optimisation

- in Artificial Neural Network for the Prediction of Tool Life, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 31, (2007), pp. 871-876.
- (17) Kotaiah, R. K., Srinivas, J., and Sekar, M., Prediction of Optimal Stability States in Inward-turning Operation Using Neurogenetic Algorithms, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 45, (2009), pp. 679-689.
- (18) Sakarinto, W., Narazaki, H., Shirase, K., A Knowledge-based Product Model Data for Integrating CAM-CNC Operation, *LEM21*, (2009), pp. 95-100.
- (19) 児玉紘幸, 廣垣俊樹, 青山栄一, 小川圭二, データマイニングによるエンドミル切削条件の決定法 -工具カタログデータの非階層・階層クラスタリングの併用効果-, 砥粒加工学会誌, 55, 1, (2011), pp. 42-47.
- (20) Kodama, H., Hirogaki, T., Aoyama, E., and Ogawa, K., Investigation of End-milling Condition Decision Methodology Based on Data Mining for Tool Catalog Database, *International Journal of Automation Technology*, 6, 1, (2012), pp. 61-74.
- (21) 児玉紘幸, 廣垣俊樹, 青山栄一, 小川圭二, データマイニングを応用したエンドミル加工条件の決定支援, 2009年度砥粒加工学会論文集, (2009), pp. 273-274.
- (22) Koonce, A. D., Fang, H. C., Tsai, C. S., A Data Mining Tool for Learning from Manufacturing Systems, *Proceedings of the 21st International Conference on Computers and Industrial Engineering*, 33, 1-2, (1997), pp. 27-30.
- (23) 二戸田健吾, 青山英樹, 加工ノウハウの自動データベース化技術の開発, 型技術者会議講演論文集, (2005), pp. 206-207.
- (24) Nishio, S., Kawano, H., and Han, J., Knowledge Discovery in Object-Oriented Databases, *Proceedings of AAAI Workshop on Knowledge Discovery in Database*, (1993), pp. 186-198.
- (25) 元田浩, 山口高平, 津本周作, 沼尾正行, データマイニングの基礎, 情報処理学会, 10, (2006).
- (26) Ichard, A. J., Dean, W. W., 多変量解析の徹底研究, 現代数学社, (1992), 666.
- (27) Karim, K. H., Communications of the ACM, *Magazine of the Association for Computing Machinery*, 44, 7, (2001)
- (28) 福田好朗, 生産システムの軌跡, 精密工学会誌, 65, 1, (1999), pp. 13-18.
- (29) 塚本充, 亀井且有, 井上和夫, 経験的知識を利用した概念形成モデル, 情報処理学会第37年全国大会講演論文集, (1988), pp. 1377-1378.
- (30) 宋哲源, 青山英樹, ボールエンドミル摩耗分布予測システムの開発, 砥粒加工学会誌, 53, 3, (2009), pp. 162-167.

- (31) 児玉紘幸, 廣垣俊樹, 青山栄一, 小川圭二, データマイニングによるエンドミル切削条件決定法からの知識抽出 -自明な工具パラメータを除いたマイニング手法の提案-, 砥粒加工学会誌, 56, 3, (2012), pp. 173-178.
- (32) Kodama, H., Hirogaki, T., Aoyama, E., and Ogawa, K., Use of Catalog Mining to Extract Valuable New Knowledge Hidden in Trivial Parameters, *Proceedings of International Mechanical Engineering Congress & Exposition*, (2013).
- (33) Hirogaki, T., Aoyama, E., Ogawa, K., Kodama, H., and Kitamura, T., Decision Methodology of End-milling Using Data-mining, *Journal of the International Societies for Precision Engineering and Nanotechnology*, 35, 2, (2011), pp. 197-203.
- (34) 中川平三郎, 松芳隆之, 大西宏明, 廣垣俊樹, エンドミル加工における軸方向切り込み量が工具寿命に及ぼす影響, 精密工学会誌, 71, 2, (2005), pp. 273-277.
- (35) 白瀬敬一, 佐野雅基, 平尾正利, 安井武司, エンドミル加工におけるびびり振動の解析と抑制 (第一報) -時間領域切削シミュレーションによる不等ピッチエンドミルのびびり振動解析-, 64, 3, (1998), pp. 465-469.
- (36) Kodama, H., Hirogaki, T., Aoyama, E., and Ogawa, K., Cutting Condition Decision Methodology Based on Data-mining of Tool Catalog Data, *Proceedings of International Manufacturing Science and Engineering Conference*, MSEC2010-34199, (2010).
- (37) 児玉紘幸, 廣垣俊樹, 青山栄一, 小川圭二, 工具カタログデータにデータマイニング手法を応用した粗加工用切削条件決定支援手法, 砥粒加工学会誌, 56, 12, (2012), pp. 824-829.
- (38) Kodama, H., Hirogaki, T., Aoyama, E., and Ogawa, K., Aid of End-milling Condition Decision Using Data Mining from Tool Catalog Data for Rough Processing, *International Journal of Advanced Materials Research*, 325, (2011), pp. 345-350.
- (39) Prakasvudhisarn, C., Kunnapapdeelert, S., and Yenradee, P., Optimal Cutting Condition Determination for Desired Surface Roughness in End Milling, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 41, (2009), pp. 440-451.
- (40) 中川平三郎, 廣垣俊樹, 西村駒次, 垣野義昭, 喜田義宏, 大塚裕俊, 金型用焼き入れ鋼のエンドミル加工の関する研究 -SKD11 と SKD61 の比較-, 精密工学会誌, 67, 5, (2001), pp. 834-838.
- (41) Harding, J. A., Shahbaz, M., Srinivas, and Kusiak, A., Data Mining in Manufacturing: A review, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 128, (2006), pp. 969-97.
- (42) Kodama, H., Hirogaki, T., Aoyama, E., Ogawa, K., and Sakamoto, J., Effects on Proposed

- Cutting Condition Decision Support System Using Data Mining on Saving Power Consumption, *Proceedings of The 6th International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century*, (2011).
- (43) Sakamoto, J., Hirogaki, T., Aoyama, E., Ogawa, K., and Kodama, H., Cutting Condition Decision Support System Using Data Mining -Application of Life Cycle Assessment on Estimation of Cutting Conditions-, *Design for Innovative Value Towards a Sustainable Society*, (2012), pp. 640-644.
- (44) Kodama, H., Hirogaki, T., Aoyama, E., Ogawa, K., and Sakamoto, J., LCA Estimation of End-milling Condition Derived from Catalog-mining Considering Human Learning Curve, *Proceedings of ASME2012 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference*, (2012).
- (45) 當麻昭次郎, 大森茂俊, 小久保邦雄, 立野昌義, LCA 手法を用いた環境対応加工の環境負荷評価 -環境対応旋削加工における二酸化炭素排出量-, *精密工学会誌*, 69, 6, (2003), pp. 825-830.
- (46) 横川宗彦, 當麻昭次郎, 環境低負荷旋削加工の LCA 環境負荷評価とコスト評価, *日本機械学会[No.01-20] 第3回生産加工・工作機械部門講演会講演論文集*, pp. 51-52.
- (47) 吉村宏, 丹羽小三郎, 中村隆, 糸魚川文広, 環境にやさしい油膜付水滴加工液(OoW)の潤滑・冷却特性評価, *日本機械学会[No.04-3] 第5回生産加工・工作機械部門講演会講演論文集*, pp. 101-102.
- (48) Sreejith, P. S., and B. K. A. Ngoi, Dry machining of the future, *Journal of Materials Processing Technology*, 101, (2000), pp. 287-291.
- (49) Sutherland, J. W., V. N. Kukur, and N. C. King, An experimental investigation of air quality in wet and dry turning, *Annals of the CIRP*, 49, (2000), pp. 61-64.
- (50) Timothy Gutowski, Jeffrey Dahmus, and Alex Thiriez, Electrical energy requirements for manufacturing processes, *Annals of the CIRP*, (2006), pp. 1-5.
- (51) Jeffrey B. Dahmus and Timothy G. gutowski, Recycle of Ceria-based Glass Polishing Powder Using NaOH Solution, *The Chemical Society of Japan*, 10, (2000), pp. 725-731.
- (52) 成田浩久, 河村浩志, 則久孝志, 陳連冶, 藤本英雄, 長谷部孝男, 工作機械による加工の環境負荷予測システムの開発 (第1報) -環境負荷の算出手法の提案-, *日本機械学会論文集 (C編)*, 71, 704, (2005-4), pp. 280-287.
- (53) 成田浩久, 河村浩志, 則久孝志, 陳連冶, 藤本英雄, 長谷部孝男, 工作機械による加工の環境負荷予測システムの開発 (第2報) -環境効率指標の提案-, *日本機械学会論文集*

- (C 編), 72, 715, (2006), pp. 241-246.
- (54) 工作機械-消費電力測定方法-, JIS TS B0024-1~4, マシニングセンタ, 数値制御旋盤及びターニングセンタ, 横軸各テーブル形平面研削盤, 円筒研削盤.
- (55) 齋藤義夫, 工作機械の環境対応に関する規格, 精密工学会誌, 78, 7, (2012), pp. 573-576.
- (56) 原雄太, 齋藤義夫, 田中智久, 工作機械の消費電力評価方法の確立, 平成 16 年度 機械知能システム学科学士論文抄録.
- (57) MITSUBISHI MATERIALS, 最適切削条件の探索, 精密工学会関西支部講習会 生産技術特別セミナー -工作機械, 切削加工, レーザ加工の基礎と最新動向-, pp. 67-77.
- (58) 臼杵年, 佐藤公紀, 守谷光広, 岩田薫, 澤田太郎, 久保田和幸, 島順彦, 難削材料の雰囲気制御エンドミル加工, 精密工学会誌, 71, 9, (2005), pp. 1120-1124.
- (59) 黒川敦史, 小幡文雄, 上原一剛, 高速回転ツールホルダの高剛性化, 日本機械学会講演論文集 No.065-2 (06-11, 中国四国支部・九州支部合同企画 鳥取講演集), pp. 165-166.
- (60) 森下道夫, 木幡文雄, 上原一剛, 岡本尚機, ツールホルダの耐びびり性向上, 日本機械学会講演論文集 No.035-1 (03-3, 中国四国支部 第 41 期総会・講演会), pp. 353-354.
- (61) 南斎規介, 森口佑一, 東野達, 産業連関表による環境負荷原単位データブック(3EID) -LCA のインベントリデータとして-, 独立行政法人国立環境研究所地球環境研究センター, (2002).
- (62) 藤嶋誠, 工作機械の消費電力削減, 精密工学会関西支部講習会 生産技術特別セミナー -工作機械, 切削加工, レーザ加工の基礎と最新動向-, pp. 25-32.
- (63) 片岡眞吾, 原価見積における習熟曲線理論の活用, 豊橋創造大学短期大学部報, 12, (1995), pp. 147-161.
- (64) Kodama, H., Hirogaki, T., Aoyama, E., Ogawa, K., and Shindou, M., An End-milling Condition Decision Support System Using Data-mining for Difficult-to-cut Materials, *International Journal of Advanced Materials Research*, 565, (2012), pp. 427-477.
- (65) Kodama, H., Hirogaki, T., Aoyama, E., and Ogawa, K., An Indicative End-milling Condition Decision Support System Using Data-Mining for Difficult-to-cut Materials Based on Comparison with Irregular Pitch and Lead End-mill and General Purpose End-mill, *International Journal of Advanced Materials Research*, 797, (2013), pp. 177-182.
- (66) 新堂正俊, 児玉紘幸, 廣垣俊樹, 青山栄一, 赤外線画像に基づくエンドミル加工現象の診断技術の開発 (工具温度と加工能率の関係の考察), 同志社大学理工学研究報告, 53, 2, (2012), pp. 19-25.

- (67)山根八洲男, 関谷克彦, 難削指数による難削性の評価, 70, 3, (2004), pp. 407-411.
- (68) Babur, O., Hasan, O., and Hasan, K., Optimum Surface Roughness in End Milling Inconel 718 by Coupling Neural Network Model and Genetic Algorithm, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 27, (2005), pp. 234-241.
- (69) Rahman, M., Wang, Z. G., and Wong, Y. S., A Review on High-Speed Machining of Titanium Alloys, *JSME International Journal (Series C)*, 49, 1, (2006), pp. 11-20.
- (70) 関谷克彦, 山根八洲男, 鳴瀧則彦, Ti-6Al-4V 合金の高速エンドミル加工, 精密工学会誌, 70, 3, (2004), pp. 438-442.
- (71) Li, A., Zhao, J., Luo, H., Pei, Z., and Wang, Z., Progressive Tool Failure in High-speed Dry Milling of Ti-6Al-4V Alloy with Coated Carbide Tools, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, (2011), pp. 1-14.
- (72) Chen, G., Ren, C., Yang, X., Jin, X., and Guo, T., Finite Element Simulation of High-speed Machining of Titanium Alloy (Ti-6Al-4V) Based on Ductile Failure Model, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 56, (2011), pp. 1027-1038.
- (73) 関谷克彦, 山根八洲男, 鳴瀧則彦, ニッケル基超耐熱合金 Inconel718 の高速エンドミル加工における工具摩耗, 精密工学会誌, 70, 8, (2004), pp. 1086-1090.
- (74) Lin, S. Y., Lin, J. C., Lin, C. C., Jywe, W. Y., and Lin, B. J., Life Prediction System Using A Tool's Geometric Shape for High-speed Milling, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 30, (2006), pp. 622-630.
- (75) 景山雄介, 干強, 階層的クラスタリングに基づく応答曲面法, 日本機械学会論文集 (A 編), 70, 695, (2004), pp. 59-67.
- (76) 田中哲平, 坂本尚久, 小山田耕二, 階層型応答曲面法, 日本シュミレーション学会論文誌, 2, 1, (2010), pp. 23-31.
- (77) 細川晃, 小澤匡史, 田中隆太郎, 古本達明, 上田隆司, 旋削加工における MQL の効果 (ファイバ連結型 2 色温度計を用いた工具刃先温度の測定), 精密工学会誌, 74, 10, (2008), pp. 1080-1085.
- (78) 上西康弘, 廣垣俊樹, 青山栄一, 中野裕介, 丹下宏美, 片山傳生, サーモグラフィによるギヤ起振力評価システムの確立, 日本機械学会論文集 (C 編), 77, 703, (2005), pp. 1085-1090.
- (79) Kodama, H., Hirogaki, T., Aoyama, E., and Ogawa, K., Experimental Verification of Ball End-milling Condition Decision Support System Applying Hierarchical and Non-hierarchical Clustering Method, *Proceedings of The 7th International Conference on Leading Edge*

- Manufacturing in 21st Century*, (2013).
- (80)Kodama, H., Hirogaki, T., Aoyama, E., and Ogawa, K., and Hukasawa, H., Proposal of Ball End-milling Condition Decision Methodology Using Data-mining from Tool Catalog Data, *International Journal of Key Engineering Materials*, 523-524, (2012), pp. 386-391.
- (81)児玉紘幸, 廣垣俊樹, 青山栄一, 小川圭二, 工具カタログデータにデータマイニングを適用したボールエンドミル切削条件決定支援手法の提案, *精密工学会誌*, 79, 10, (2013), pp. 964-969.
- (82)竹内芳美, 長坂学, 森重功一, ボールエンドミルの先端切れ刃・側面切れ刃を併用した5軸制御加工, *精密工学会誌*, 61, 4, (1995), pp. 561-565.
- (83)池野誠, 中川平三郎, 小川圭二, ボールエンドミルの損傷と寿命に関する実験的検討, 第8回生産加工・工作機械部門講演会講演論文集 (D33), (2011), pp. 251-252.
- (84)Lu, Y., Takeuchi, Y., Takahashi, I., and Anzai, M., An Integrated System Development for Ball End Mill Design -Creation and Evaluation-, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 25, (2005), pp. 628-646.
- (85)大塚裕俊, 山路伊和夫, 垣野義昭, 中川平三郎, 焼き入れ鋼のエンドミル加工に関する研究 (第3報) -ボールエンドミルの切削抵抗の簡易推定式とそれによる切削抵抗の一定化制御-, *精密工学会誌*, 69, 4, (2003), pp. 549-553.
- (86)Soo, S. L., Dewes, R. C., and Aspinwall D. K., 3D FE Modeling of High-speed Ball Nose End Milling, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 50, (2010), pp. 871-882.

謝辞

本研究を実施するに際し、数多くの御教示、御鞭撻を賜った本学教授 青山 栄一 博士、本学教授 廣垣 俊樹 博士に対し深く感謝の意を表します。

本研究の遂行並びに本論文の作成にあたり、懇切なるご指導を賜りました滋賀県立大学助教 小川 圭二 博士に心より深く感謝致します。

また、貴重な時間を割いて多くの御助言を頂きました(株)三藤機械製作所 野辺 弘道 博士に心より感謝を致します。

本研究を行うにあたり、DBM・CCM研究会においてご指導を賜りました垣野技術研究所 所長 垣野義昭 博士、京都大学大学院工学研究科マイクロエンジニアリング専攻教授 松原厚 博士、同准教授 茨木創一 博士、同助教 河野大輔 博士、京都大学文部技官 山路伊和夫 博士、滋賀県立大学教授 中川平三郎 博士、大分県産業科学技術センター 大塚裕俊 博士、大阪工業大学教授 井原之敏 博士に深く感謝いたします。

さらに本論文の執筆にあたって多大なご助言、ご協力を頂きました大坪技術研究所 大坪寿 博士、安田工業(株) 藤本一也 氏、大昭和精機(株) 矢内正隆 氏、(株)元グラフィックプロダクツ 伊藤哲史 氏、(有)スタジオ・ウェイズ 西田晋 氏、DMG森精機製作所(株) 松岡興治 氏に深謝いたします。

本研究を行うにあたり、実験データなどの取得など多方面にわたりご協力、御助言を賜りました同志社大学大学院生の坂本純一 くん、菅谷唯 さんからの絶大なるご協力を頂戴いたしました。心から感謝致します。

本研究の一部は、日本学術振興会の特別研究員奨励費(課題番号 12J00106)を受けて行われており、その助成に対して謝意を表します。

本研究を遂行するにあたり公私にわたり様々なご協力をいただきました青山・廣垣研究室の皆様には厚く御礼申し上げます。

本研究を遂行するにあたり、常に温かく見守って下さいました両親に心から感謝致します。

最後に、本研究は以上の方々は勿論のこと、他の数多くの方々の御指導、ご協力のもとに完成されたものであることを付記すると共に、ここに謹んで御礼申し上げます。

2013年2月

児玉 紘幸