

# 知識のデジタルモデル化技術を用いた研削条件決定システムの開発

Development of Grinding Condition Determination System Using Knowledge Digital Modeling Technology

磯村和秀 K. ISOMURA 小島 大 H. KOJIMA

By digitally modeling the knowledge of experts, we have developed technology enabling anyone to easily perform high-precision machining. This model has a network structure and can comprehensively express the knowledge of experts. Based on this technology, we have developed two systems. The support tool for turning has contributed to more efficient training for new employees. Meanwhile, the grinding condition determination system, TAKUMI NEURON, has enabled processing equivalent to that of experts by optimization of grinding conditions according to production volume and reduction of study/examination period.

**Key Words:** knowledge digital modeling technology, network structure, grinding knowledge model, TAKUMI NEURON

## 1. はじめに

将来の日本のモノづくりの場においては、2025年問題でも懸念される総人口の減少や少子高齢化による労働人口の減少に伴い、人手不足や熟練者不足が深刻化すると予想される。そのため、熟練者の知識伝承の効率化が必要である。

生産現場では作業者の頭の中にある暗黙知や、教科書や報告書にまとめられた形式知、機械などから取得される加工データなど、さまざまな種類の知識が混在している。熟練者は経験からこれらの知識を組み合わせることで課題解決を行っているが、これらの知識をどのように組み合わせるかという思考過程が属人化しており、知識伝承の大きな課題となっている。

そこで、熟練者の思考過程に沿って誰もが関連する知識を活用し、課題解決することができる仕組みが必要であると考へた。そのためにはさまざまな知識をデジタル化して同じフレームで表現し、さらに熟練者の考え方を明確にし、その思考過程を見える化する「知識のデジタルモデル化」が必要である。

## 2. 知識のデジタルモデル化

### 2.1 「知識モデル」の作成

現状の知識の表現手法としては、たとえば専門家の知識をデータ化したエキスパートシステムや、機械学習な

どの学習型の推論ツールの活用が考えられる。しかしながら、エキスパートシステムでは知識の全てを記述することは難しく、機械学習はモデルの中身がブラックボックスとなるため解の導出過程が一切分からない。さらに、これらの手法は課題解決の適用事例が変わるたびに固有のモデルを構築する必要があるため、今回必要と考える知識表現の仕組みを満足することが難しい。

そこで、生産現場の知識を網羅的に表現でき、かつ、解の導出過程が説明できる仕組みとして「知識モデル」を株式会社豊田中央研究所と共同で開発した。

知識モデルは対象分野の知識を形式知化して保存したものである(図1)。技術用語を因子と定義して、因子をネットワーク構造で相互接続させる。そして、各因子にデータ値を設定し、因子間の関連性を接続条件で表現することで知識を形式知として保存している。

つまり、さまざまな種類の知識を因子とデータ値で表現し、熟練者の思考過程を因子の接続順と接続条件で表現したモデルとなっている。因子のデータ値や接続関係には、定性的、または定量的な情報が設定できる。そして、熟練者の知見に基づく経験値やルールまたは数理モデルなどに基づいた接続関係や接続因子間の寄与度から、多様な接続関係が作成される。このような独自の知識ネットワーク構造は熟練者の知識を網羅的に表現することが可能であり、入力から出力に至る過程を把握できるホワイトボックスとなっている。

さらに、ある分野の知識モデルを一度構築し入出力の

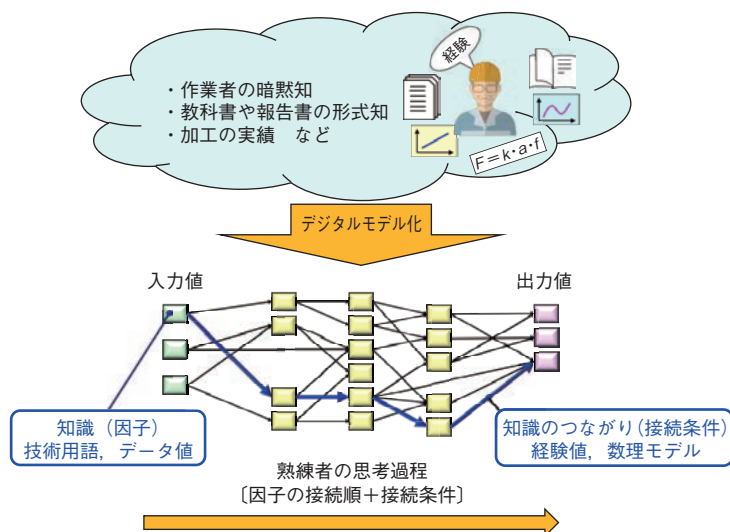


図1 知識モデルの概念図  
Conceptual diagram of knowledge model

因子を指定して情報を抽出することで、一つの知識モデルをさまざまな課題解決に対して活用し、熟練者の考え方を学ぶことが可能である。また、知識モデルは熟練者の知識を基に構築するため、少ないデータでも構築することができる。

## 2.2 モノづくり教育現場への活用

### 2.2.1 旋削加工支援ツール

開発した知識モデルの仕組みを使用して、外径旋盤加工に関する旋削知識モデルを作成した。旋削知識モデルは複数人の熟練技能者からのヒアリングや教材などから工作物や工具、加工条件、加工結果など旋削加工に関連する因子を抽出し、それら因子を熟練者の思考過程に沿って知識ネットワークを構築した。未熟練者が旋削加工の際に遭遇する課題や場面を想定しており、工作物や工具に関する情報を入力すると旋削知識モデルを探索することで、被削材や要求精度から推奨加工条件を出力できる。

さらに、旋削知識モデルを基に、異常を含めた加工結果を加工条件から予測可能な支援ツールを開発した。このツールでは、知識ネットワークのつながりを視覚的に確認でき、因子それぞれの関係性をたどることで知識の伝承も可能である。

### 2.2.2 社内新人教育実習

2019年度より、試作した支援ツールを社内新人教育実習の場面で実際に活用した(図2)。実習では加工経験の少ない新人作業員(2019年度18名、2020年度24名)が支援ツールを活用して「工作物材質別の加工特性

の違いを検証する」という課題に取り組んだ。



図2 モノづくりの教育現場での活用  
Utilization in manufacturing training

2019年度の実習では、例年実習で用いる機械構造用炭素鋼と、新人作業員にとって未知の工作物材質であるアルミニウム合金について比較検証し、アルミニウム合金の加工時に発生する構成刃先の要因分析と対策を検討した。また、2020年度の実習では、2019年度の工作物材質に加えて高炭素クロム軸受鋼や合金工具鋼、クロムモリブデン鋼を対象として、工作物材質ごとの被削性や加工異常が発生しない限界加工能率を検討した。

これらの実習課題を通して、新人作業員は指導員に頼ることなく一人で目的や場面に応じた幅広い条件選定や対策立案が可能となった。そして、因子の関連性や影響度から対策の着眼点を養うことや知識の深掘りができ、「考働力」を身に付けることにつながった。

さらに、この支援ツールの活用により、図3、4に示すようにカリキュラムの拡充や実習時間の約60%短縮

など教育実習の効率化にも貢献した。

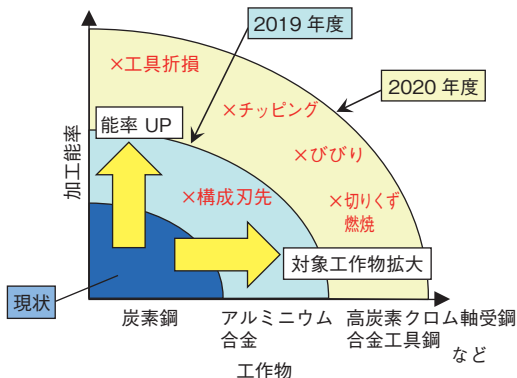


図3 実習カリキュラムの内容  
Details of training curriculum

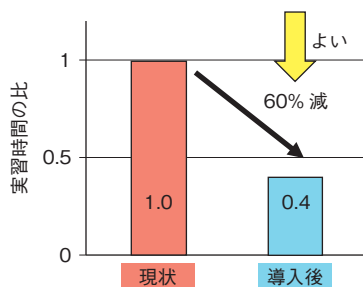


図4 課題解決実習の時間  
Problem-solving training time

### 3. 研削条件決定システム「TAKUMI NEURON」

#### 3.1 研削加工の生産現場での課題

研削加工は切削加工に比べて発熱量が大きいので、工作物の熱変質を引き起こしやすい。また、高い加工精度を求められるが、加工精度は研削条件だけではなく砥石修正条件や砥石修正タイミングで大きく変化する。そのため、研削条件の設定は難しく熟練者の知識や技術に依存している。

経験の浅い技能者は最適な研削条件の設定ができないため、熟練者に比べて高負荷の研削条件を設定してしまい、その結果砥石寿命は短くなる。また、仕上げ工程を必要以上に長い時間設定する場合もある。加えて、試加工、測定、条件変更を繰り返すことで研削条件の検討にも時間がかかる。

#### 3.2 研削加工の知識モデル化

こうした課題を解決するため、研削加工の熟練者の知識を抽出して研削知識モデルを作成した。研削盤の中で、お客様から好評いただいているカムシャフト研削システム

（図5）のカムローブ部とジャーナル部を対象にした研削条件決定システム「TAKUMI NEURON」を開発した。



図5 カムシャフト研削システム  
Camshaft grinding system

「TAKUMI NEURON」は工作物や砥石、要求精度といった諸元を入力することで、要求サイクルタイムを満たす工作主軸回転速度や送り速度、切り込み量といった研削条件、予測される加工精度、砥石の修正条件、砥石寿命（ツルイングインターバル）を演算する（図6）。研削知識モデルのアルゴリズムの中に、研削盤の機械性能、寿命や切れ味（研削抵抗）などの砥石性能情報といった研削条件を演算するために重要な知識や理論、情報が含まれている（図7）。当社がこれまで培ってきた研削加工の技術・知識がベースにあり、さらに熟練者の思考過程をひもとくことで知識モデルの接続に重み付けを行っている。これによって、本システムは最適な研削条件や正確な加工精度の予測が可能となり、お客様はテスト加工なしに要求値を満たすかどうか判断できる。経験の有無にかかわらず、「誰でも簡単に熟練者と同様の加工ができる」研削条件が選定可能になった。

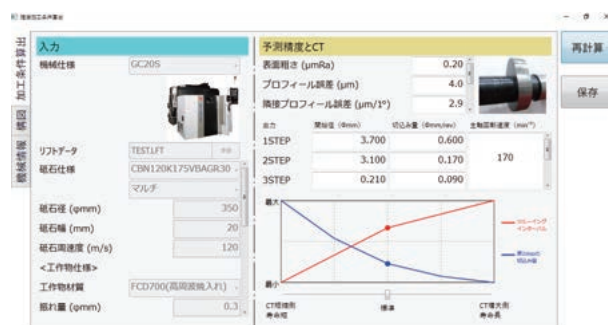


図6 研削条件決定システム「TAKUMI NEURON」  
Grinding condition determination system,  
TAKUMI NEURON

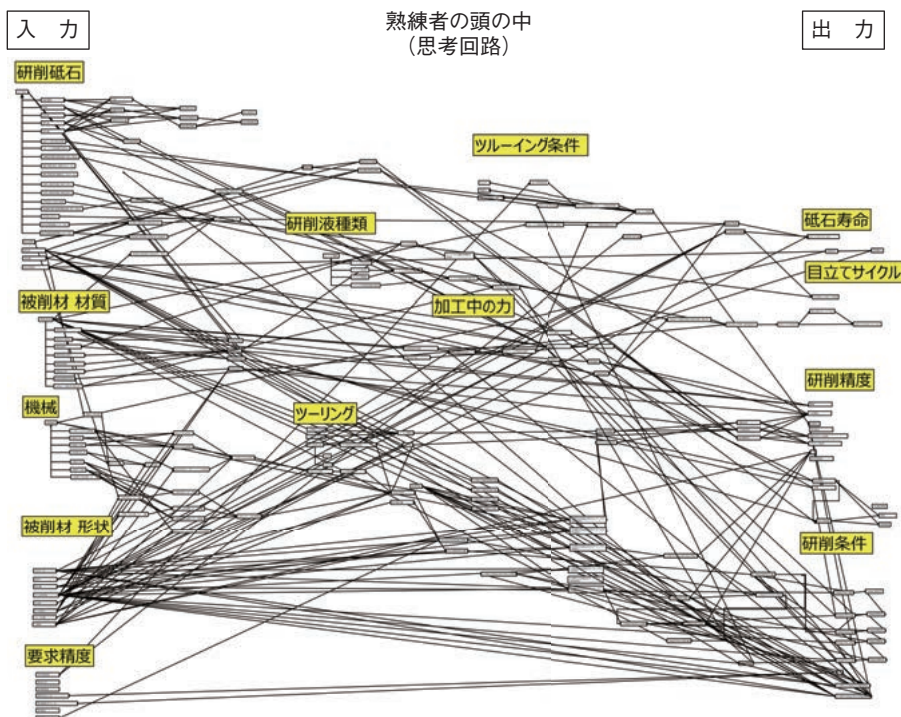


図7 カム研削知識モデル  
Cam lobe grinding knowledge model

### 3.3 熟練者と同等レベルの加工

実際にあるカムローブで同じ加工精度を目標にして、中堅者と熟練者、「TAKUMI NEURON」が選定した研削条件の加工時間を比較した。工作物の材質がFCDの場合、「TAKUMI NEURON」は熟練者と同等の加工時間の研削条件を演算することができ、中堅者と比べると22%短縮することが可能だった(図8)。同様に材質がスチールの場合、中堅者に比べて39%短縮することが可能で、熟練者とほぼ同等の加工時間だった(図9)。いずれの事例も加工精度は熟練者の条件と同等だった。

工作物材質が変化しても、材質の特徴に合わせて熟練者と同様の研削条件を演算できた。以上のことから、「TAKUMI NEURON」は、「誰でも簡単に熟練者と同様の加工ができる」システムとして利用することが可能となる。

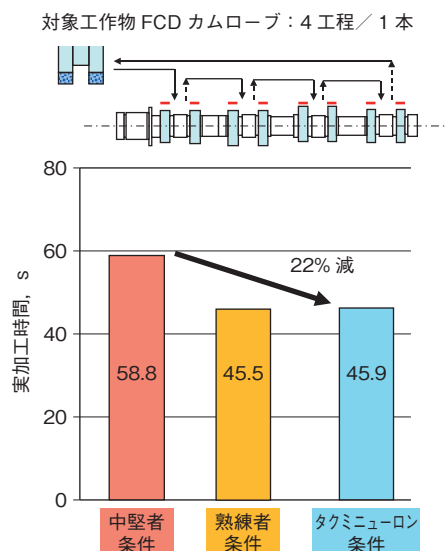


図8 中堅者と熟練者、「TAKUMI NEURON」の加工時間の比較 (FCD カムローブ)  
Comparison of machining time between expert, mid-engineer and TAKUMI NEURON (FCD cam lobe)

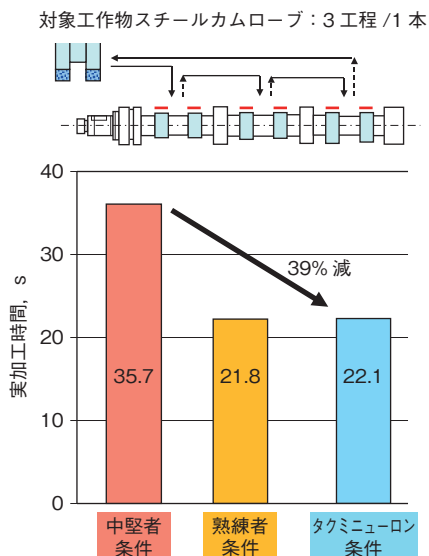


図9 中堅者と熟練者、「TAKUMI NEURON」の加工時間の比較（スチールカムローブ）  
Comparison of machining time between expert, mid-engineer and TAKUMI NEURON (Steel cam lobe)

### 3.4 生産量に合わせた研削条件の選択と検討時間の短縮

また本システムは、一度に複数の研削条件を出力することができ、標準の研削条件と生産性を向上させた条件、砥石寿命を延ばした条件をそれぞれ演算する。これらの条件は、「TAKUMI NEURON」画面内のグラフのスライダーを動かすだけで、それぞれのサイクルタイムと砥石寿命の比較が可能である。お客様はそれを確認することにより、生産量に合わせた最適条件を簡単に選定できる。

あるカムローブの標準研削条件に対して、生産性を向上させたサイクルタイム短縮条件と砥石寿命を延ばした条件をそれぞれ比較した（図10）。生産性を重視した研削条件の場合、標準条件と比べて生産性を1.3倍（実加工時間0.7倍）まで向上させる条件を出力した。同様に、砥石寿命を重視した場合、標準条件と比べて砥石寿命を1.3倍に延ばした研削条件を出力した。どの条件でも加工精度は同等であり、加工精度を変化させずに生産性と砥石寿命どちらを優先させるか柔軟に選択できる。この機能によって、新規量産品の研削条件検討時間を短縮することができ、熟練者がいない現場でも生産量変更に伴う研削条件の変更を簡単に行うことが可能となる。

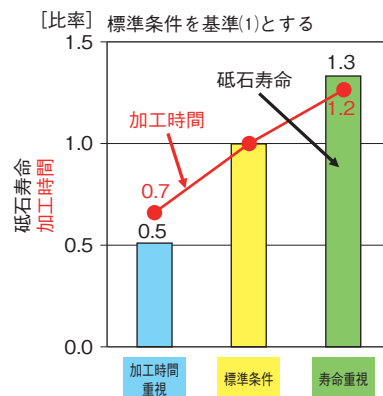


図10 「TAKUMI NEURON」の出力結果の比較例  
Comparison example of output results by TAKUMI NEURON

### 3.5 加工前の検討時間短縮

量産前の工作物の研削条件を決めるには、

- ①類似した工作物の実績があるか調べる。
- ②その実績と対象工作物の差異から研削条件を調整する。
- ③試加工・測定を行い、加工精度と加工時間を目標値と比較して再度加工を行う。

中堅者であれば②③を何度も繰り返し、熟練者であっても1～2回は研削条件の調整を行う。参考になるものがない場合、試加工の回数はさらに増加する。「TAKUMI NEURON」は、条件選定までの時間を大幅に短縮できる（図11）。当社調査結果では、中堅者に比べて75%、熟練者と比べても50%短縮できた。これによって、工場の生産ラインの立ち上げや試作用工作物の準備時間の短縮が可能になる。

加えて、「TAKUMI NEURON」を利用することで、砥石変更を検討する際の事前検証が可能となる。これまで、稼働しているラインで砥石メーカーから提案された砥石を従来砥石と比較していた。この場合、ラインの研削条件で目標に達するか評価するため、大量に加工して評価する必要があった。一方、本システムを活用すると、お客様は砥石をアプリ上で選択することにより、要求精度やサイクルタイムに適する砥石を従来のものと比較して容易に選択できる。これによって、これまで時間がかかっていた砥石選定の時間を大幅に短縮することが可能になる。

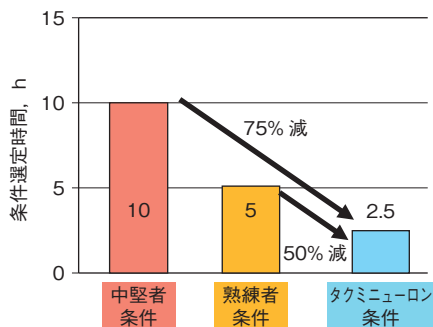


図11 「TAKUMI NEURON」による条件選定時間の短縮  
Reduction of condition selection time by TAKUMI NEURON

フトなどの量産加工品や多品種少量の高精度加工品に工作物の適応範囲を拡大していく。

一方で、「TAKUMI NEURON」の知識モデルを現状の固定方式から、可変方式へ進化させていく(図12)。加工中の機械の状態データや加工中・加工後の工作物測定データを取り込み、お客様個々のルールを追加することで、「TAKUMI NEURON」内の知識モデルを自動更新させていく。それにより、お客様が使用している機械ごとに最適な研削条件をタイムリーに演算し、世界のモノづくりに貢献していきたい。

\* TOYODA は、株式会社ジェイテクトの登録商標です。

#### 4. おわりに

今後は、多種工作物の研削加工に関連した熟練者ノウハウのデジタルモデル化を進めていく。そして、減速機やコンプレッサーの偏心シャフト、EV用モーターシャ

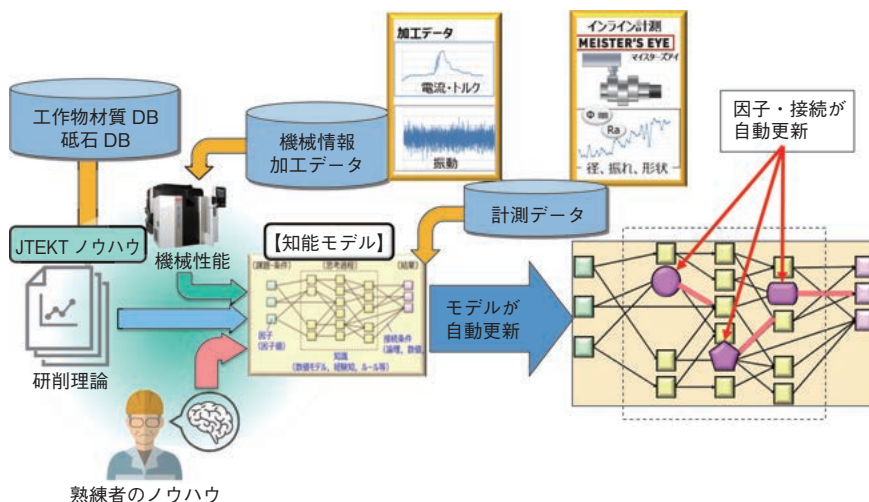


図12 「TAKUMI NEURON」のあるべき姿  
Ideal vision for TAKUMI NEURON

#### 筆者



磯村和秀\*  
K. ISOMURA



小島大\*\*  
H. KOJIMA

\* 工作機械・システム事業本部 先行開発部  
\*\* 研究開発本部 加工技術研究部