

## わたしたちの研究 (4)精密計測加工学・デジタル設計生産学研究室

松原 厚 (S60/1985卒)

## 1. 私たちの研究室

私、松原厚はマイクロエンジニアリング専攻マイクロシステム創成講座・精密計測加工学分野とデジタル設計生産学講座の教授を担任しています。精密計測加工学分野は、先代の垣野義昭教授から引き継いだ研究室であり、デジタル設計生産学講座は2020年度にスタートした寄付講座（森記念製造技術研究財団）です。

研究室の教員の紹介を図1に示します。

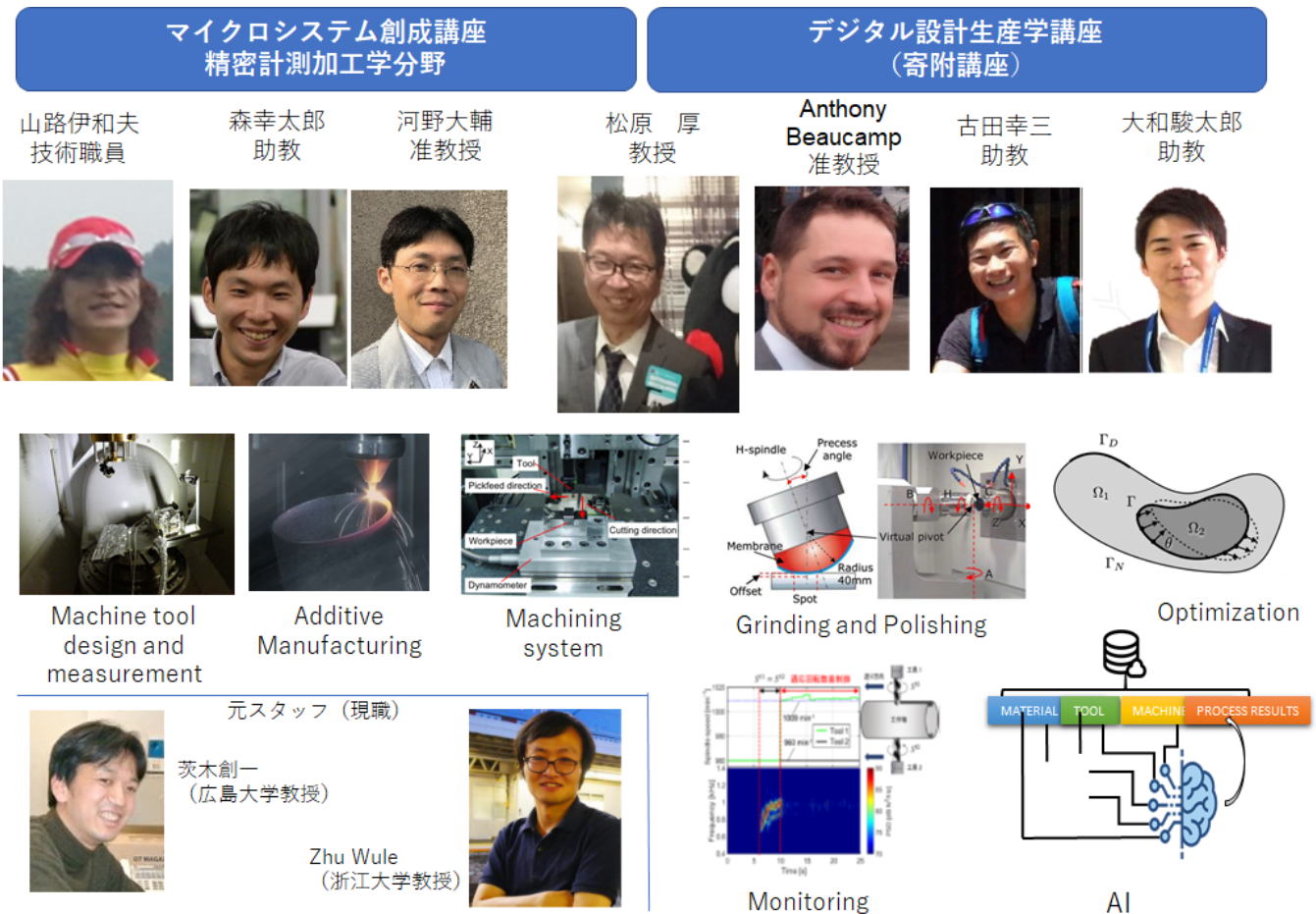


図1 私たちの研究室（教員）

研究室には、他に大学院博士3名、大学院修士10名、学部生7名、事務補佐員2名（令和3年5月現在）が在籍し、かなりの大所帯です。

## 2. 私の経歴紹介

私、松原厚は、昭和55年に本学機械工学科に入学し、昭和60年に学部を卒業しました。卒業研究では、柴田俊忍先生の研究室で卒業研究を行いました。その後、

株式会社村田製作所に入社し、生産技術開発を担当しました。入社当時、会社には京大機械系の卒業生はほとんどいなかったのですが、最初の上司は万波研卒の山本信也さんでした。在職中に京都工芸繊維大学の社会人修士課程に入学し、山本鎮男教授の指導を受けていました。退社後に修士課程を修了し、京都大学工学部精密工学教室・松久寛教授（当時は助教授）の研究室で研究生として振動制御の研究を行いました。その後、垣野教授の精密計測加工学研究室で助手に採用され、学位を取得して現在に至っています。研究内容は、垣野教授が始められた工作機械の運動精度計測をベースに、モーション制御、構造設計、加工システム開発、知能化と多岐に渡ります。

工作機械の運動精度について、他分野の方に話すと「1ミクロンは簡単に測れますよね」と言われます。確かに、数mm程度の範囲に限るとか真っすぐ動いた場合だけとかだと可能です。しかし、工作機械は運動空間が大きく運動体の姿勢が変化します。一つの物体を仮に剛体と仮定しても6自由度ありますから、要素がつながったらとんでもなく複雑になります。垣野教授は、ダブルボールバー（DBB測定法、[図2](#)）を開発して運動誤差診断法を確立され、産業界と様々なプロジェクトを進行されました。運動精度計測に関しては、広島大学の茨木創一教授と大阪工業大学の井原之敏教授が引き継いで発展されています。

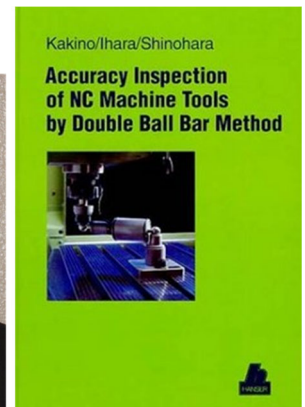


図2 垣野教授とDBB測定法に関する著書

### 3. 精密計測加工学分野の研究

#### 3. 1 計測から設計へ

運動精度とともに重要な工作機械の性能は剛性です。また、加工においては、治具や工作物も含めた系の総合的な剛性が重要になります。加工系の剛性を測定し、剛性に基づいて加工誤差の少ない加工条件を決めるのが理想ですが、加工プロセス中にオペレータが剛性を測定するのは非常に手間がかかります。

そこで、河野准教授がピエゾ式の加振装置を開発し、オンマシンで剛性を評価する方法を開発しています。加振装置を工作機械の主軸に装着してNCプログラムで加振を制御することで、加工プロセス中の剛性モニタリングを自動で行えるよ

うにしました (図3)。剛性のモニタリング結果に基づいて、治具の設置不良修正や加工条件の修正をオペレータに提案するシステムや、機械が自律的に加工プロセスを制御するようなシステムの構築を目指しています。

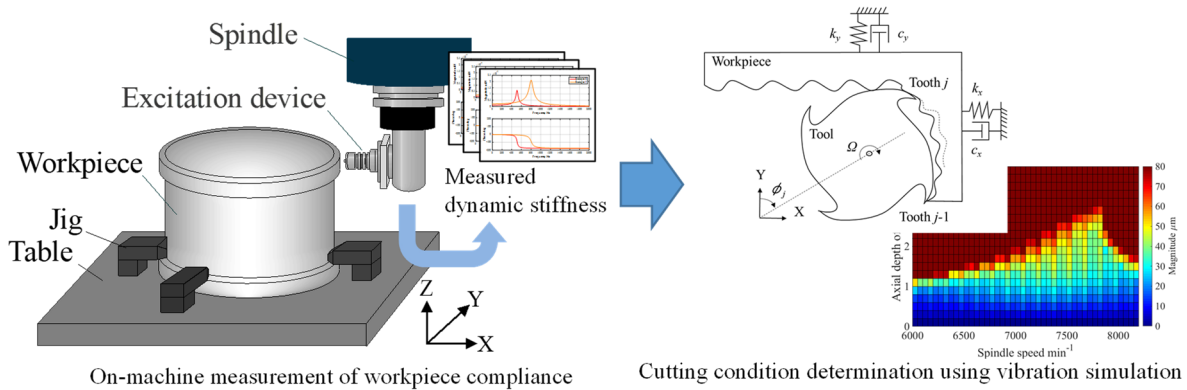


図3 加工系の剛性のオンマシン計測に基づいた加工条件最適化

工作機械の心臓部は主軸です。主軸は、回転数、剛性、ふれで評価されます。これらは生産性と精度に直結するからです。ふれに関して、多くの測定法があるのですが、剛性に関しては主軸停止時の剛性しか測定されていませんでした。そこで電磁式荷重発生装置を開発して、主軸の回転中に静剛性と動剛性の両方を評価できるようにしました。主軸にダミーツールをつけて、回転させながら電磁コイルで吸引して加振するという単純な装置ですが、渦電流を抑制することが難しく、試行錯誤して応答を数kHzまで向上しました。単に加振するだけでは面白くないので、モデルで加振力を生成して加工を模擬することを思いつきました。これをリアルタイム加工シミュレーション (図4) と呼んでいて、工具もワークも消費せず加工機や加工条件を評価することができます。

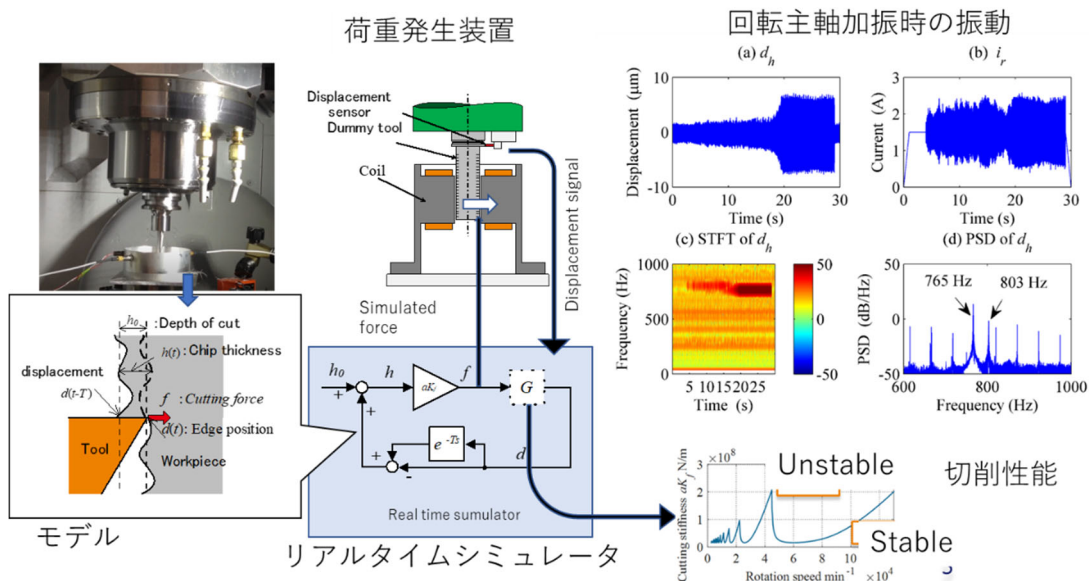


図4 荷重発生装置を用いたリアルタイム加工シミュレーション

機械の性能が実際の運転にそって評価できるようになると、さまざまな問題が明らかになります。主軸に関していえば、回転時の発熱による伸びと剛性の変化です。これに関して、河野准教授は温度変化による主軸剛性の変化をシミュレートし、さらには剛性変化を低減する研究に取り組んでいます。まず、有限要素法と幾何学的なベアリングのモデルを組み合わせ、①温度変化→②ベアリングの接触角と予圧の変化→③ベアリング剛性の変化→④主軸剛性の変化という一連の現象を再現しました(図5)。また、材料のマルチマテリアル化によって熱変位に異方性を持たせ、ベアリング内外輪の相対変位を小さく設計することで、ベアリング剛性の変化を抑制することを試みています。予圧の変化を低減することで温度上昇も抑えられるため、3. 3節で後述する冷却エネルギーの削減にも寄与できると期待しています。

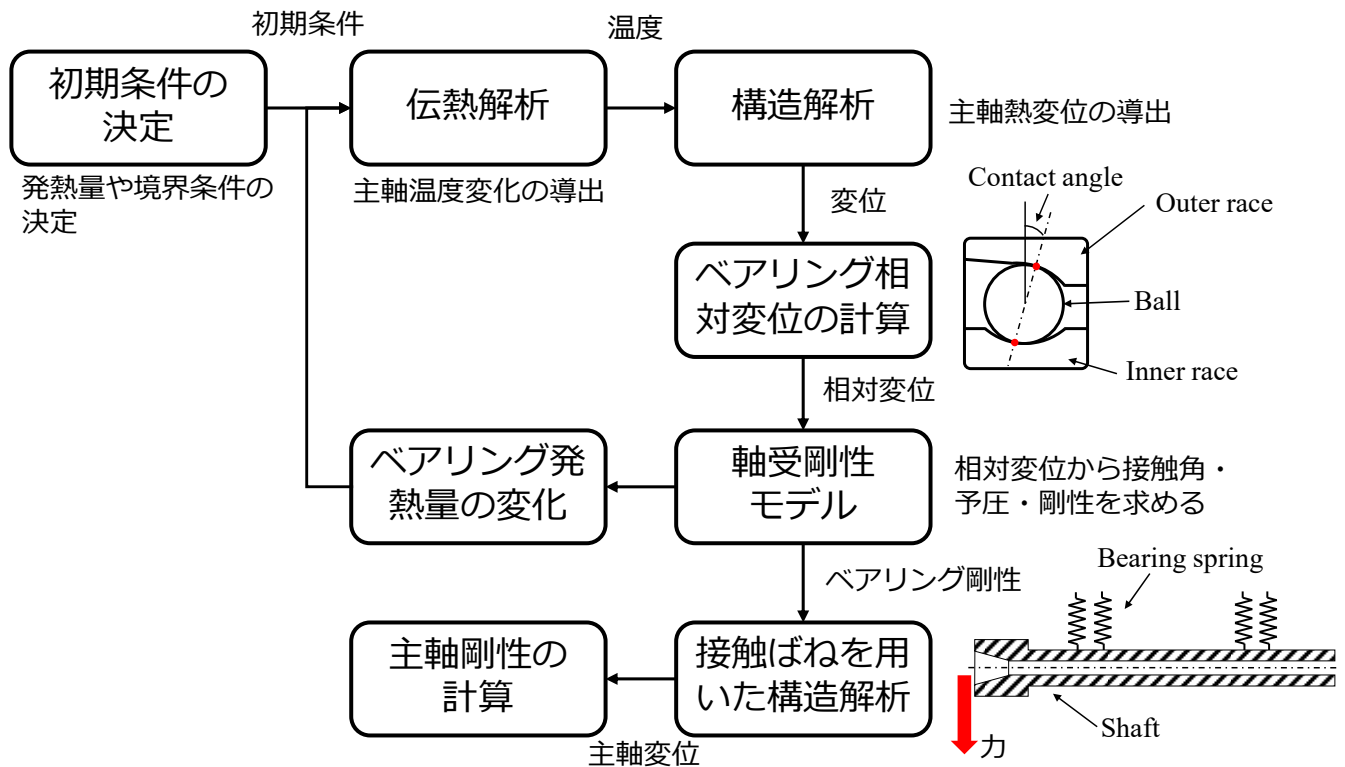


図5 主軸剛性シミュレーションの流れ

### 3. 2 計測から人の感性へ

航空機エンジンの部品加工の研究でタービンケースなどの薄肉加工の振動メカニズムをずいぶん調べました。そんな現場のテーマを？と思われるかもしれませんが、現場の加工現象は本当に難しいし、その振動原理は教科書の理論では説明できないのでおもしろいと思いました。学生さんとカオスの勉強をし、様々なデ

一タを解析しました。図6は、修士学生だった高田希恵さん（現シマノ）が工作物の加工振動の相図で見つけてくれたパターンです。これらはとても美しく気に入っています。現在はこういった現象の可視化とモデル化を加工音の官能評価に組み合わせられたいかと考えています。

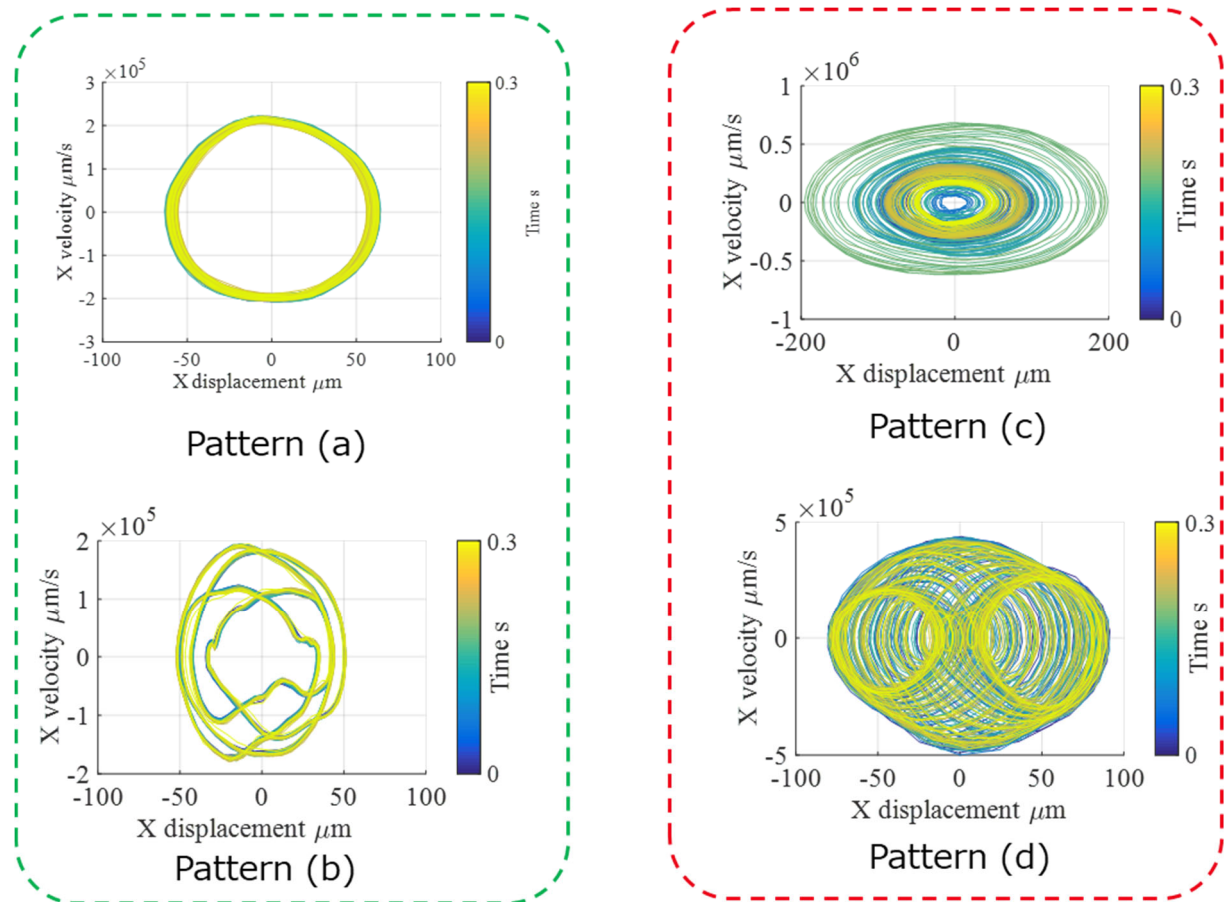


図6 薄肉加工に現れる振動パターン：(a)(b)は安定、(c)(d)は不安定

聴覚以外に、熟練者が加工の評価に使っているのが視覚です。熟練者は加工面のわずかな異常に気づいたり、数マイクロメートルのあらかのレベルをあてられたりしますが、そのメカニズムが不明です。そこで加工面から拡散反射して人間の目に届く光の量を波長ごとにシミュレーションで計算して、デジタル画像や官能評価の結果と比較することを試みています。これによって熟練者の認知していることを、科学的に非熟練者に伝えることが可能になると考えています（図7）。これもデジタデータ応用の一種ですが、博士課程学生の井原基博君が光学の専門家と加工の専門家の意見を聞きながら、粘り強くシミュレータをつくり、人間の目と認識の謎を明らかにしてもらっています。

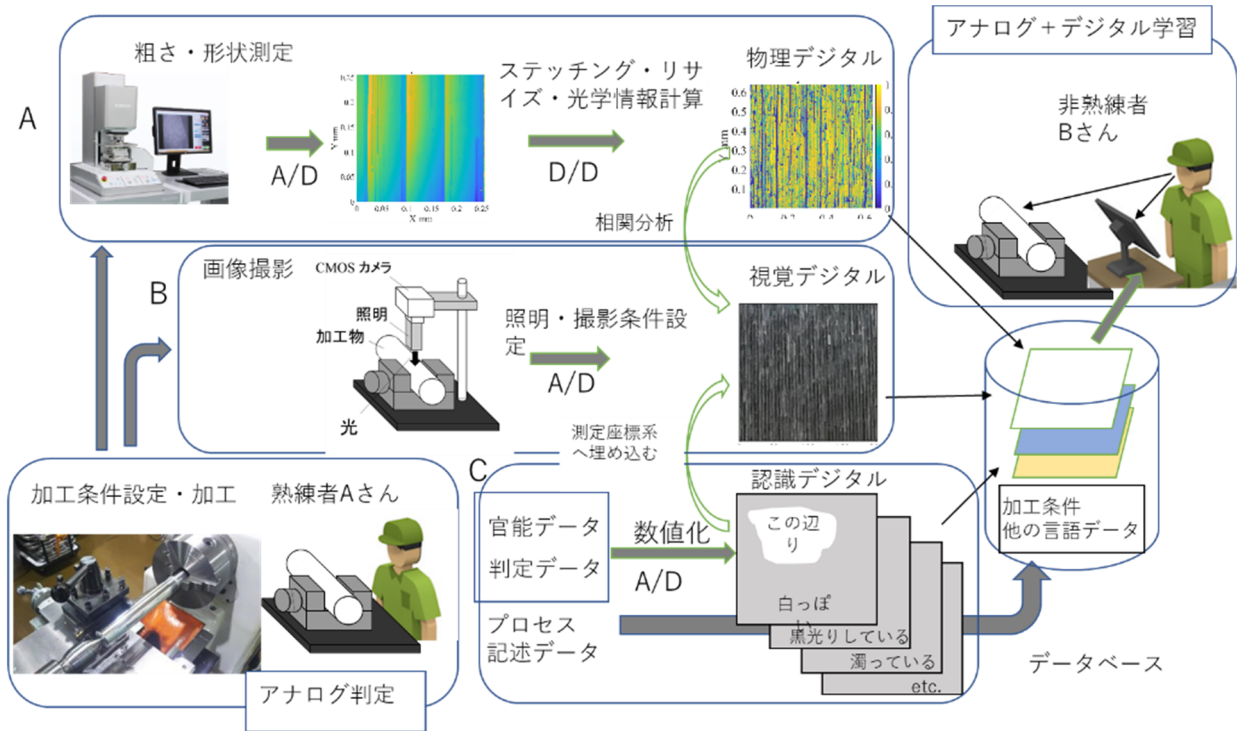


図7 計測データからデジタルデータへの変換による官能指標の解析

### 3. 3 計測から環境負荷低減へ

再生可能エネルギーを使うようになると、気象予測が重要になるでしょう。晴れなら太陽光、雨が続けば水力、風の強い日は風力というように、気象を予測しながら、電力を選択すれば供給側の平準化はできます。一方、消費側の工場は、暑いとき冷やす、または寒いときに温めると消費電力が平準化できません。ところが現在、加工現場の温度は、冬期 $20\pm 1^{\circ}\text{C}$ ・夏期 $24\pm 1^{\circ}\text{C}$ 前後に空調されている例が多いです。しかし、この設定には、しっかりとした根拠があるわけでは無いようです。エネルギー消費削減が求められる今、金属加工工場でも消費電力を最小化するように空調を運転するようになっていくと予想しています。森助教は、加工誤差を要求レベル以下に抑えながら工場空調のエネルギー消費を削減できる加工システムを開発しています。

まず、あまり研究されていない工作機械運転→環境負荷の関係をモデル化するところから進めています。図8に、運転状態ごとの空調熱負荷を、あるマシニングセンタで測定した例を示しています。左から、主電源OFF、主軸10,000回転（＝加工状態）、アイドル状態です。加工状態とアイドル状態を比べていただくと、アイドル状態の発熱がかなり大きいことがわかります。アイドル中の消費電力の多くが、冷却由来のものです。

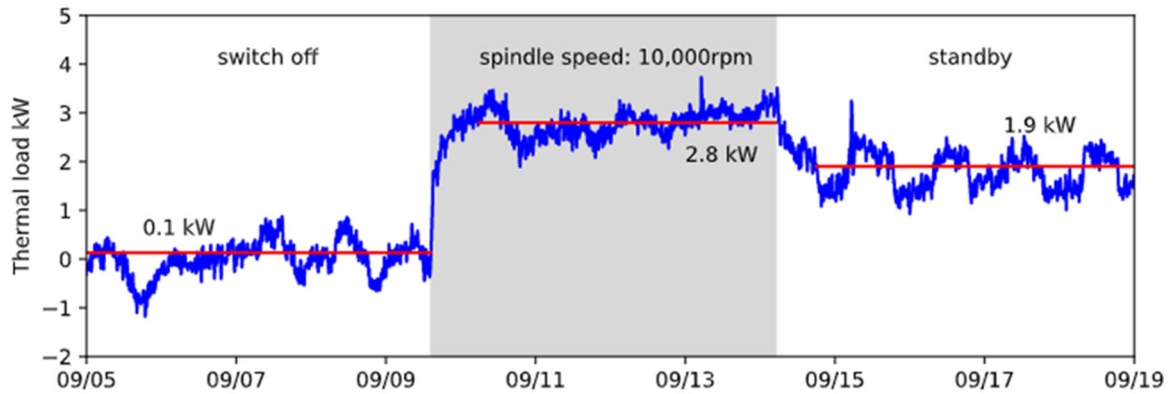


図8 運転状態と空調熱負荷の関係

また、冷却と熱変位は表裏一体の関係です。図9に、室温を変えながらYZ平面の熱変位を測定した例を示します。室温変化で生じる熱変位が無視できないことがわかります。この熱変位は変化のスピードがわかればNC装置で補正することができます。これまでの工作機械の冷却では、とにかく標準温度に冷やすことを目指していましたが、室温制御と補正技術をうまく組み合わせれば、冷却の省エネルギー化が図れます。

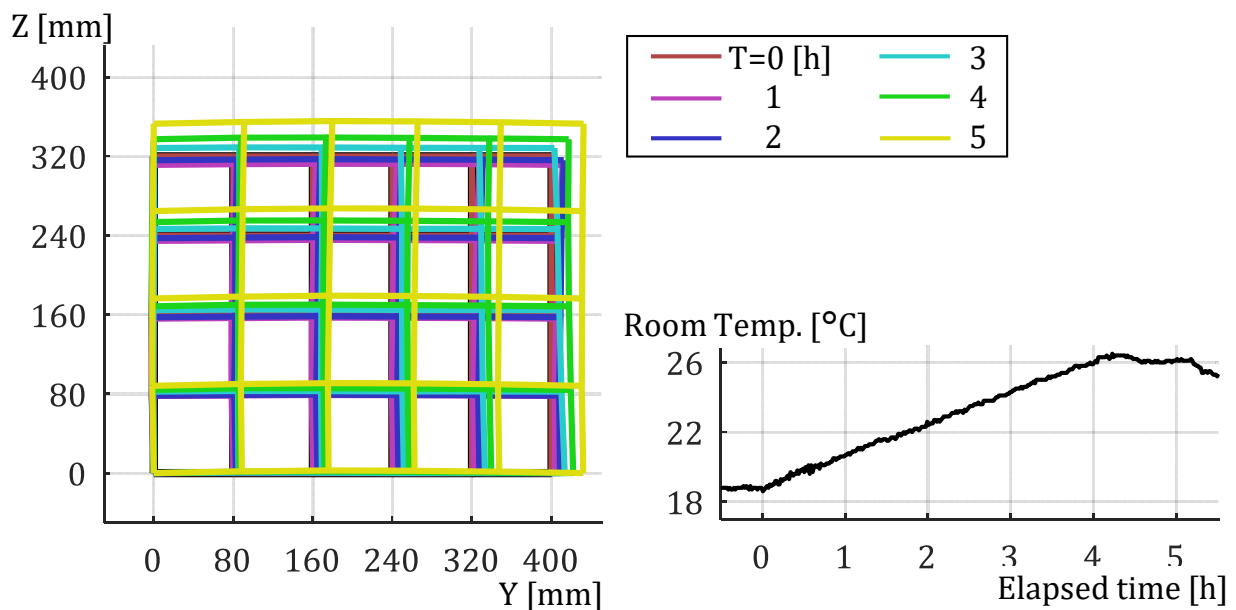


図9 室温変化により生じる熱変位 (YZ平面) の可視化 (誤差1000倍)

#### 4. デジタル設計生産学講座の研究

「設計と製造をデジタル技術でつなぐ」を目指して設置しました。まだ立ち上がって1年で、研究はこれからなので簡単に説明します。

Beaucamp准教授は、光学部品の研磨の専門家です。彼は、フランス人ですがイギリスの大学で物理学を専攻、その後イギリスの研磨加工機メーカーで実務を経験し、来日してX線ミラーの研磨で有名な中部大学の難波義治教授に師事しました。CAD/CAMに強く、オープンソースを使った加工システムをつくってもらっています。彼にかかるとどんな材料でもピッカピカになるのですが、最近はAdditive manufacturingで積層した部品の研磨をやってもらっています。結構難しいのですが、着実にデータベースを構築してくれています。

古田助教は、西脇研の出身で熱問題のトポロジー最適化を得意にしています。現在、直感で操作できるトポロジー設計法を研究してもらっており、設計結果をAdditive manufacturingにダイレクトにわたせるようにしようとしています。

大和助教は、慶応大学にてモデルベースドなモニタリングの研究で博士号を取得し、この4月に研究室に加入してもらいました。現在、Beaucamp准教授と新しい原理のCAM開発やAI活用に取り組んでもらっています。

## 5. 終わりに

寄附講座ができたときに研究室ロゴをつくろうかと思って素案に図10のような「理」(ことわり) マンダラを考えました。一番大事だと思う「理」を真ん中において、まわりに漢字を配置しましたが、やるたびに代わってしまうので、そのままにしています。大学は真理の探究が使命ですが、いろんな「理」が、我々の活動を支えていると思います。

そして、さまざまな研究で貢献してもらった卒業生、研究・教育の支援をしていただいていたみなさまに、この場を借りて御礼を申し上げます。

撰 真 原  
 心 理 経  
 情 合 倫

図10 「理」マンダラ