

特集：新世代商品群の生産技術

26

「魂動デザイン」の深化に向けたこだわりのモノ造り ～金型加工精度を向上させる空調空間の造り込み～

Special Manufacturing toward “KODO” Design Deepening -Craftsmanship for Air Condition Space to Improve Die Machining Accuracy-

中山 教憲*¹ 名越 慶*² 森下 喬*³
Takanori Nakayama Kei Nagoshi Takashi Morishita
井川 史朗*⁴ 木谷 英治*⁵
Shiro Ikawa Eiji Kitani

要 約

生命感・躍動感をカタチにする「魂動デザイン」は、「クルマに命を宿す」ことを普遍的なものとして、新世代デザインでは「引き算の美学」により要素を削ぎ落したシンプルなフォルムとし、より研ぎ澄まされた繊細な光の表現を追求している。そのデザインの深化は「魂動デザイン」を量産する生産技術の進化なしには実現できない。金型加工ではその新世代デザインの繊細な造形をカタチ造るため加工精度を更に向上させる必要がある。本稿では、金型加工精度を向上させるために、加工精度に影響する金型加工機周辺の温度環境について、気流シミュレーションを用いて必要最小エネルギーで金型加工精度向上を実現した取り組みについて紹介する。

Summary

Under the universal theme of “Provide a life to a vehicle, “KODO” design which makes the vitality and dynamics a form pursues the simple form which scraped off the elements by the “Aesthetics of deduction” in the next generation design and further seeking for the expression of the well-honed sensitive light. The deepening of that design cannot be achieved without an advancement of the production engineering to realize mass production with “KODO” design. Stamping die machining needs to improve the machining accuracy more in order to form that sensitive next generation design form. This article introduces the efforts to achieve the improvement of the die machining accuracy under the temperature environment around the die press machines which largely influences the die machining accuracy by using the air current simulation with minimum energy.

Key words : Production・Manufacture, Die/Mold, Machining, Die Machining Accuracy, Heat・Fluid, Air Conditioner, CFD, Temperature Control/Environmental Control

1. はじめに

マツダは、「魂動デザイン」を通じてお客様へ人生の輝きを提供することを目指し、先代（2012年～）以降、マツダの象徴として多くのお客様に受け入れていただいた。新世代デザインは見る方向によってボディに映り込んだ「景色」, 「光」がさまざまなリフレクションを表現しており、シャープエッジのキャラクターラインはなく曲面のみでシンプルなフォルムから発するキャラク

ターは「力強さ」と「艶やかさ」を感じさせるデザインへと深化した（Fig. 1）。新世代デザインを支える金型製作革新はマツダの使命としてより高みを目指している。

Fig. 2はデザイン形状に対する要求精度の変遷を示している。キャラクターライン重視の先々代に対して面重視の先代は金型精度1/7化を実現した。そして新世代デザインは部品間の一致度を高めボディ全体でデザインの流れを表現するため、金型精度を先代比2/3にする必要があった。

*1～4 プラント技術部
Plant Engineering Dept.

*5 ツーリング製作部
Tool & Die Production Dept.



Fig. 1 KODO Design

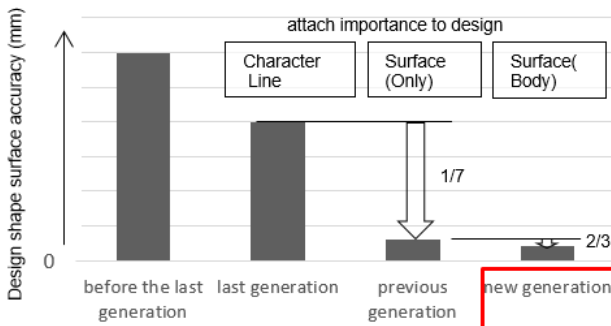


Fig. 2 Transition of Design Requirement Accuracy

金型精度を向上させるため、金型加工機械（以下、加工機）の加工誤差要因である①主軸先端位置変位（以下、主軸変位：Fig. 3）、②切削異常、③刃物異常、④加工原点設定、⑤NCデータ誤差を改善すべく技術開発を行った。本稿では、機械加工誤差の43%を占める①主軸変位を少なくするため加工機械周辺温度環境の改善を実現した取り組みについて紹介する。

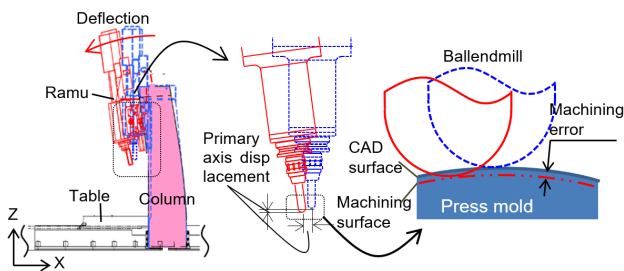


Fig. 3 Primary Axis Top End Position = Machining Error

2. 魂動デザイン深化に向けた課題抽出

加工機は切削物を段取りするテーブルを挟んで、高さ5mの2本のコラム（主柱）とクロスレールで門型を構成している。主軸変位とは加工機周辺の温度変化によるコラムのたわみと、主軸が付くラムとテーブルの伸び縮みで主軸先端の位置変位をもたらす現象のことをいう。経験値より数十マイクロメートルの主軸変位があることは分かっていた。そのため、金型を機械加工する場合は複数の工具を使用するが、交換の都度主軸変位に伴う誤差の補正を行っている。しかし、切削中の主軸変位には対応できず、新世代デザインの繊細な曲面を崩す懸念があったため、主軸変位対策が急がれた。

主軸変位は加工機上下の温度差と1日の温度変化が大きく影響することが考えられる。そこで加工機周辺の温度環境と主軸変位量との関係を明確にするため調査を実施した。温度測定は熱電対を加工機のコラム上下（床面から0.5mと4.5m）と前後の計8箇所を設置し、変位測定はラムのX/Y/Z軸に非接触式変位センサーを設置した（Fig. 4）。

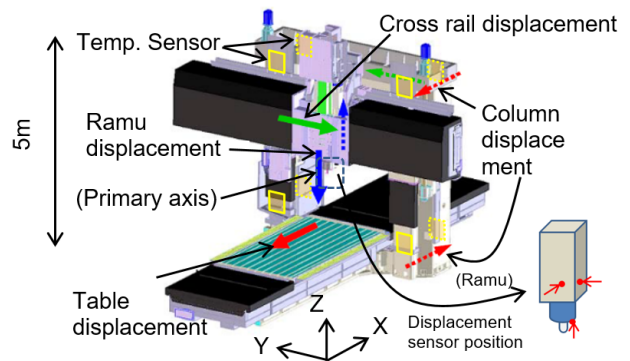


Fig. 4 Processing Machine Heat Displacement Minimization

加工機周辺の温度環境は時々刻々と変わるため、一定期間調査を実施し、そのなかで特に加工機コラムの上下の温度差及び1日の温度変化が大きい日と小さい日を比較検証した。Fig. 5に調査結果を示す。上のグラフはコラム上下温度差と主軸変位の時間変化を示し、上下温度差が大きくなると主軸変位も大きくなっている。下のグラフはコラム上部の温度と主軸変位の時間変化を示し、温度変化の大きい日ほど主軸変位は大きくなっている。以上より、加工機上下の温度差と1日の温度変化が主軸変位に影響を与えていることが確認できた。また温度変化の小さい日は、目標とする主軸変位量以下にも収まっているため、この日の温度環境を年間通じて維持することを目標として設定した。

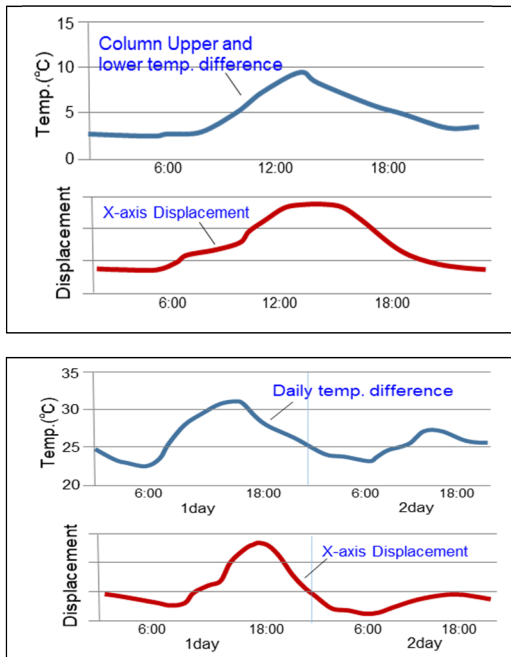


Fig. 5 Sensing Result

更に、作業者に対する温熱環境も改善させるため、作業位置 (FL.+1.5m) で、夏期28℃以下、冬期18℃以上とすることを前提条件とした。主軸変位の改善目標、及び加工機周辺温度の目標値をTable 1に示す。

Table 1 Target Value

	Status	Target
Displacement	—	6G ratio 1/3
Column Upper and lower temp. difference	Max 10℃	Under 2.5℃
Daily temp. difference	Max 10℃	Under 4℃

3. 課題解決

3.1 課題解決コンセプト

金型加工工場は面積が約10,000㎡と広く、室内温度は外気温や日射の影響を受けやすい。また、建屋高さは15mあるため室内の上下温度差も大きい環境である。従来技術で室内温度を均一化しようとする建物を全館空調し、莫大なエネルギーを使用することとなる。また、加工機周辺に仕切りを設け、空調空間を極力小さくした場合でも加工機発熱や加工機自体の高さ (5m) を考えると加工機周辺の温度ムラを解消するためには、同様に大きなエネルギーが必要となる。マツダの環境ビジョンにある「豊かで美しい地球と永続的に共存していく未来」を実現するために大空間の中でも加工機周辺の空間だけを必要最小エネルギーで温度均一化することをコンセプトとした。

必要最小エネルギーで加工機周辺空間の温度を均一化させるためには、成り行きでは空気の性質により自然と上下に温度差がつくため空間を上下にかき混ぜる。そして加工機周辺空間の外側空気の影響を受けないよう仮想の壁を作り、空調した空気を循環させて余計なエネルギーを使わないことが有効と考えた。そこで、空調した空気を加工機周辺で動かし、上下の空気をかき混ぜて温度を早く、精度良く均一に維持する。更に外乱に強い循環 airflow を空調機の風向風速温度を調整することで実現する技術の確立を目指した。

加工機周辺で循環する気流を作るため、加工機の周辺に吹き出し方向が調整可能な空調機を4台設置する構成とし、吹き出し温度、風向、風速をコントロールすることで目標達成を目指した。

3.2 CFD解析による事前検証

加工機周辺の温度環境は昼夜・四季により刻々と変化する。この中で24時間365日温度環境を維持する方策を実機や試作機を用いて構築することは時間と手間がかかる。そこで、これまで進めてきたCFD (Computational Fluid Dynamics) 解析を更に進化させ、机上で十分に事前検証をすることが重要と考え解析を開始した。今回CFD解析した解析モデルをFig. 6に示す。加工機は中央のMachining areaに設置されている。

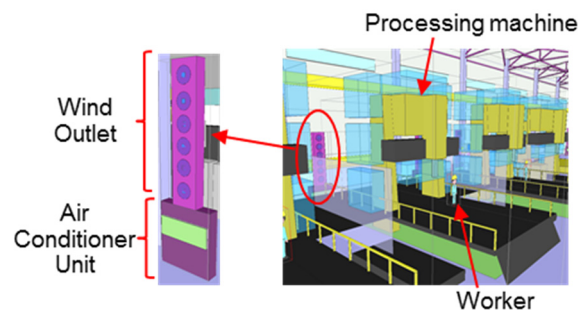
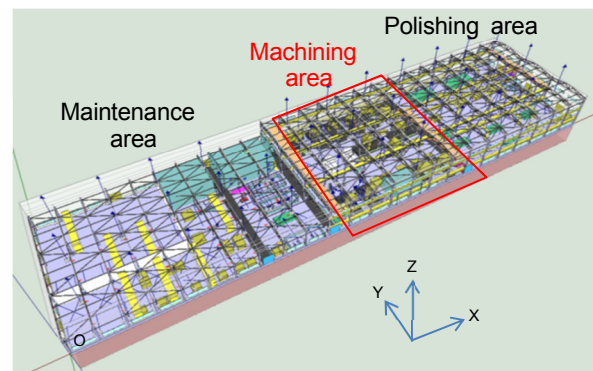


Fig. 6 Analysis CFD Model

金型加工工場の熱収支を考えると外気温や日射による熱負荷が支配的であり、これらは屋根・壁等から熱伝

導・熱対流・熱放射といった複雑な形で入ってきて刻々と変化する。CFD解析を精度よく行うためには、これらの影響を正確に解析モデルに反映する必要がある。そのためにCFD解析のIPO (Input-Process-Output) を明らかにした上で、全ての項目について評価・検証した (Fig. 7)。

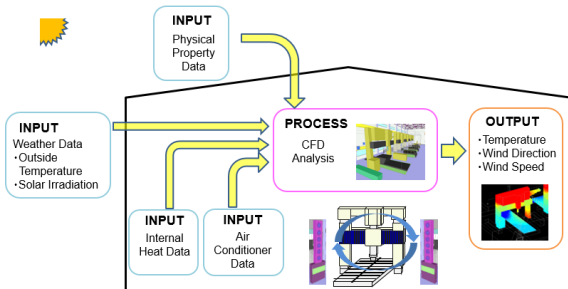


Fig. 7 CFD Analysis IPO Model

影響因子ごとに理論式から熱量を計算し、部位ごとの単純モデルによる計算結果と、現地での測定結果を比較検証し、モデルの確からしさを確認した上で解析モデルに投入することを繰り返し、精度向上させた。そしてCFD解析で精度よく再現できるようになった後、魂動デザインを実現するため、年間を通して目標を達成できる気流を検討した。

3.3 上下温度差対策 (暖房期の気流検討)

加工機周辺の空気をかき混ぜ、温度を均一化するために、空調機4か所のうち2か所の風向を上向き45度に、残り2か所を下向き45度にして、上向きの気流が周辺空気により自然と冷却され下降することで、加工機の周辺を大きく循環する気流を作ることをねらいCFD解析を実施した。すると、上向きの暖房風が循環することなく、そのまま上昇し発散した。解析結果を分析すると、日中に外気温上昇と日射により温められた空気が天井付近に滞留しており、上向きの気流が周辺空気により自然と冷却されることなく発散しねらいの気流とならなかった (Fig. 8a)。そこで、空調機からの気流の慣性により加工機周辺の空気をかき混ぜることを考えた。空調機4か所のうち2か所の風向を、加工機上部をねらった上向き15度に、残り2か所を下向き15度に調整し、互いに平行に向かい合う風向とすることで、その間に挟まれた空気をかき混ぜることを考えた (Fig. 8b)。CFD解析により、各空調機から吹き出した暖気が加工機周辺を仕切り、その間の空気が加工機周辺で循環する気流が形成され、温度が均一化されていることが確認できた。更に風向や風速、温度を変化させ、気流の挙動を確認しながら、よりよい気流を作り込んだ結果、加工機上下温度差が2.4℃となり目標の2.5℃以下に抑制できることを確認できた。また、温度を均一化する空間を極力小さくすることで、最

小限のエネルギーで温度均一化できることも確認できた。

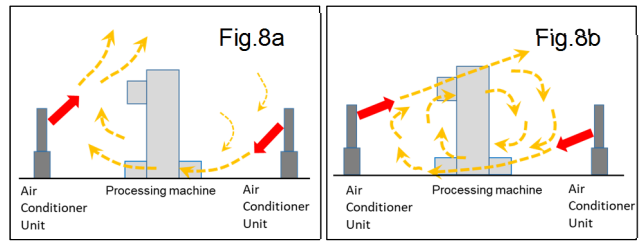


Fig. 8 Air Flow in Winter

3.4 上下温度差対策 (冷房期の気流検討)

冷房期も暖房期と同様の風向で加工機の周辺を循環する気流をねらいCFD解析を実施した。しかし、加工機上部の発熱源が循環気流を温めることと、下向きの冷気が床付近に滞留し、ねらいどおりの気流とならなかった (Fig. 9a)。

そこで、空調機の風で強制的にかき混ぜるだけでなく、冷たい空気が下降する性質も利用し、空調機からの冷気が加工機の上から下へ降りてくるような気流を考えた。その気流が加工機上部の発熱源を直接冷却するとともに、加工機上部の熱い空気との仕切りを作る効果をねらい、空調機の風向を4台とも加工機の上部付近に設定した (Fig. 9b)。

CFD解析結果より、加工機上部に吹き出した冷気が加工機を包み込むように降りてきて温度を均一化していることを確認できた。暖房期と同様に風向や風速、温度を変化させ、気流の挙動を確認しながら、よりよい気流を作り込んだ結果、加工機上下温度差が2.2℃となり目標の2.5℃以下に抑制できることを確認できた。

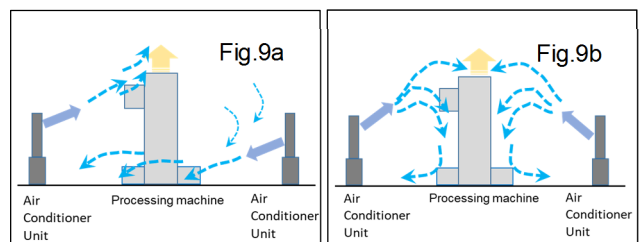


Fig. 9 Air Flow in Summer

こうして、季節ごとに気流を調整することで加工機周辺の温度を効率的に均一化する運用計画を立案した。

3.5 1日の温度変化対策

1日を通して温度一定に保つため、加工機に設置した温度計で空調吹き出し温度を制御する方式でCFD解析を開始した。これは設定温度に対してセンサー部温度が近くように吹出温度を調整する一般的なものである。しかし解析結果は1日の温度変化が目標値に届かない結果となった。結果を分析すると、設定温度になるまでの応答遅れ

が発生していることや設定温度に近づこうとして過度な冷風/温風が一時的に出ていることが分かった (Fig. 10)。このような現象は、外部からの熱影響が大きい場合や大空間の場合に発生する。今回のような工場環境ではこの影響が顕著に現れていると考えた。

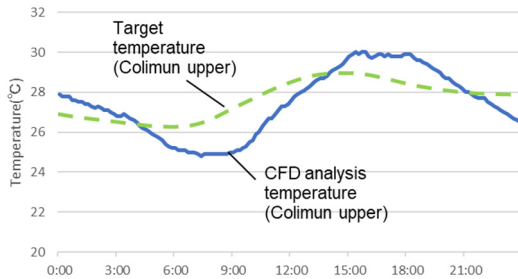


Fig. 10 Temperature Transition in One Day

工場全体の熱収支を計算すると、外気温と日射を起因とする熱負荷が95%以上で支配的であり、この熱が外乱として温度変化に影響を与えている。1日の温度変化を抑制するためには、外乱に対する応答性を向上させることと、外乱の影響を極力防止することが必要と考えた。また、必要な時間に必要だけ空調を行うことで、最小限のエネルギーで温度均一化を実現することを目指した。

まずは空調の応答性を向上させるため、温度変化の速度をとらえ、これに合わせて吹出温度を制御することが重要と考えた。吹出温度制御にセンサーの温度変化を微分パラメーターとして反映するとともに、設定値の最適化を進めた。更に温度変化に遅れなく対応するため、温度変化の主要因である外気温を考慮したパラメーターを追加し、外気温変化に応じて目標を補正することで、制御の応答性の改善を進めた。

また、加工機周辺気流の外側からの温度変化の影響を極力防止するため、外側との温度差に応じて空調機の吹出風速を調整することを考えた。温度差が大きくなるにつれ気流を強くし、周囲の空気との遮断効果を高くすることをねらい、気流の制御を取り入れた。

CFD解析でFig. 10と同様の条件で改善後の制御方式を適用した場合の解析結果をFig. 11に示す。応答性の向上と気流調整による外乱の影響防止により、加工機周辺の温度変化が小さくなっていることが分かる。

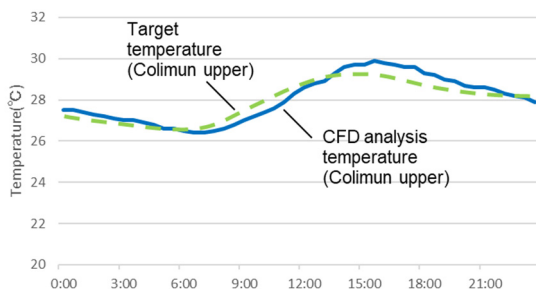


Fig. 11 Temperature Transition in One Day

4. 効果検証

このCFD解析の検討結果に基づき空調システムを構築した。実機での冷房期における温度測定結果をFig. 12 (上下温度差グラフ)、Fig. 13 (1日の温度差グラフ)に示す。上下温度差の目標2.5°C以内、1日の温度差の目標4°C以内ともに達成している。主軸変位も従来の1/3以下で目標を達成しており、本空調システムによる加工精度向上を確認できた。空調エネルギーについても全館空調と比べて約40%のエネルギー量で温度均一化を実現できている。

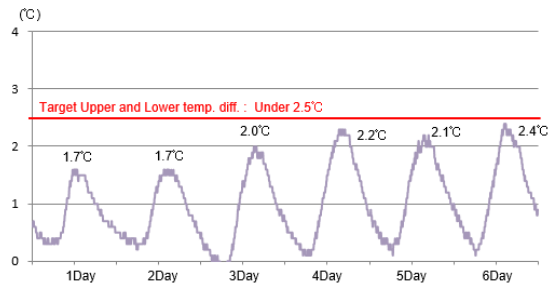


Fig. 12 Column Upper and Lower Temp. Difference

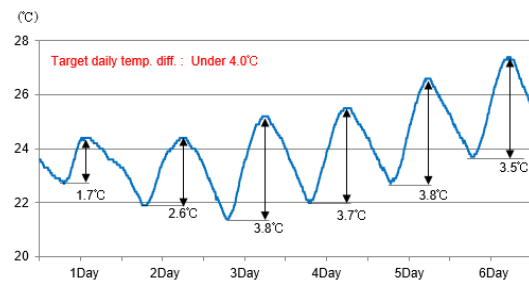


Fig. 13 Column Ambient Temperature

5. おわりに

この取り組みは、深化した「魂動デザイン」をお客様に届けたいという関係部門の共通した熱い思いが部門を超えた共創活動となり、加工精度向上につながった。今後、引き続き四季の実機検証を行い、年間を通しての温度環境改善を実現し、「魂動デザイン」を深化させ、お客様の人生の輝きにつながるクルマを提供していきたい。

参考文献

- (1) 長澄ほか：「魂動デザイン」実現に向けたプレス成形安定化の技術開発, [マツダ技報, No.35, pp.106-111 \(2018\)](#)
- (2) 西本ほか：「魂動」デザインの再現に向けたこだわりのモノづくり ～プレス金型製作編～, [マツダ技報, No.34, pp.81-86 \(2017\)](#)

■ 著 者 ■



中山 教憲



名越 慶



森下 喬



井川 史朗



木谷 英治