

国産機 3 台分の加工能力を持つタレット型複合加工機 -特許キネマティックスライド搭載インデックス社 C シリーズ-

1.はじめに

グローバル化に伴い、日本のものづくりは短絡的に低コストを追い求め、製造拠点を海外へと移管してきた。結果、日本国内では、研究開発品や試作品、少量生産の複雑部品等が主に加工されてきた。しかし、新型コロナウイルス感染症の世界的拡大や保護主義の台頭により、ロット数の多い部品においても、機密性があり、且つ付加価値が高い部品製造は、国内回帰の兆候が強まっている。

上記を背景とし、国内の製造現場では、多品種化する複雑形状部品を、短時間で加工する機械へのニーズが高まっている。このような要望に応える機械として、バー材からワンチャックで多様な工程を一台で担うのが複合加工機である。

ドイツ・インデックス社タレット型複合加工機 C シリーズ (図 1) は、加工精度の安定性に優れ、複雑部品を圧倒的なサイクルタイムで加工する能力を兼ね備えている。日本製旋盤が強い競争力を持つ日本市場においても、国産機と比較し、半分から 1/3 にサイクルタイムを短縮するその加工能力が高く支持され、特に複雑な部品加工に採用されている。本稿では、C シリーズの概要説明に加え、タレット型複合加工機の課題に対する同機のソリューション、さらに加工時間を驚異的に短縮する事例を合わせて紹介する。

2. 特許キネマティックスライド搭載タレット型複合加工機 C シリーズ

インデックス社の複合加工機は、自由度の高いマシンニングセンタをベースにした ATC 型と、本稿で紹介する生産性重視の旋盤ベースのタレット型複合加工機の 2 種類がある。世界最大の旋盤メーカーであるインデックス社が、特許技術を開発し、完成させたのがキネマティックスライドを搭載した C シリーズ (図 1) である。



図 1. C シリーズ外観

2. 1. 部品形状と加工数に応じたモジュール式機械設計

C シリーズは対向 2 主軸の上下 2 式のタレット搭載の C100、C200、そして平行対向 4 主軸 3 タレットの C200 tandem (タンデム) がある。C100 と C200 は、部品形状や生産数に応じ、背面側主軸に上部タレットを追加し、合計 3 タレット仕様も可能だ (図 2)。

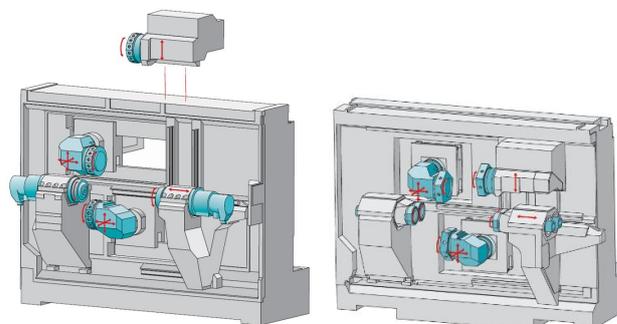


図 2. 対向 2 主軸 (左)、平行対向 4 主軸 (右)

2. 1. 1. C100

対向 2 主軸、最大旋削長 400mm、バー材最大加工径 $\phi 42\text{mm}$ 、主軸端面間距離 675mm、チャックサイズ 4 インチ (110mm)、コントローラは Siemens S840D sl か Fanuc 31i-B のいずれかを選択できる。

2. 1. 2. C200

対向 2 主軸、最大旋削長 550mm、バー材最大加工径 $\phi 90\text{mm}$ (Siemens) / $\phi 65\text{mm}$ (Fanuc)、主軸端面間距離 890mm、チャックサイズ 6 インチ (160mm)、C100 同様コントローラは Siemens S840D sl か Fanuc 31i-B の選択式となっている。

2. 1. 3. C200 tandem

平行対向 4 主軸、最大旋削長 550mm、バー材最大加工径 $\phi 52\text{mm}$ 、主軸端面間距離 840mm、チャックサイズ 5 インチ (140mm)、コントローラは Siemens S 840D sl のみの仕様である。主軸と背面側の並列 2 主軸加工用に、各タレットは、2 本組で 5 種類の工具が搭載できる。3 タレット仕様で、6 箇所同時加工が可能となっている (図 3)。

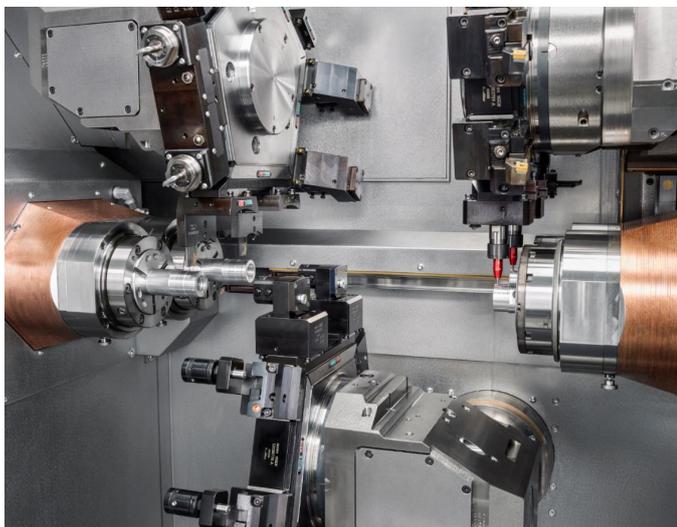


図 3. 平行対向 4 主軸の 6 箇所同時加工

3. サイクルタイムを驚異的に短縮する C シリーズの機械性能

一般的なタレット型複合加工機の課題に触れながら、優れた動的特性のタレット、高出力の両主軸、そして卓越した同時加工能力の C シリーズの特長について記述する。

3. 1. 一般的なタレット構造の動的特性の制限

一般的なタレットは、3 つの軸が重なって構成されている。第一軸の Z 軸リニアガイドの上に、Z 軸ユニット、その上に第二軸の X 軸リニアガイド、そして X 軸ユニット、最後に第三軸の Y 軸クイルの構造となっている(図 4)。この構造では、タレットを支える第一軸のリニアガイドからタレットヘッドまでに距離を要し、さらにユニットが重なることで、質量が増すことになる。その結果、タレットは曲げ剛性がなく、切込み深さが大きい加工では振動が発生し、ワークにアプローチする高送り速度・加速度も制限を受けることになる。

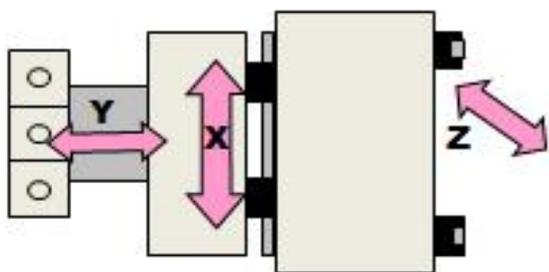


図 4. 一般的な 3 軸が重なったタレットの構造

3. 1. 1. キネマティックスライドによるタレットの動的特性の向上

C シリーズの上下 2 式のタレットは、Z 軸と X 軸の動作を、平面のプレート型キネマティックスライドに集約している(図 5)。チャックサイズ 6 インチの一般的な複合加工機の場合、タレットヘッドと第一軸のリニアガイドの距離が 800mm 前後であるのに対し、C シリーズはその半分の僅か 400mm となっている(図 5)。

たわみ量は突き出し量の 3 乗と比例する。一般的なタレットの場合、第 2 軸の X 軸があるとはいえ、単純に突き出し量としてみると、C シリーズの 2 倍となる。同じ加工負荷では 8 倍のたわみ量が発生することになり、本機と比較し、低切込み低速送りの加工をせざるを得ないことになる。インデックス社特許のキネマティックスライド搭載のタレットであれば、大きい切込み深さと高速送りでサイクルタイムを大幅に短縮する。

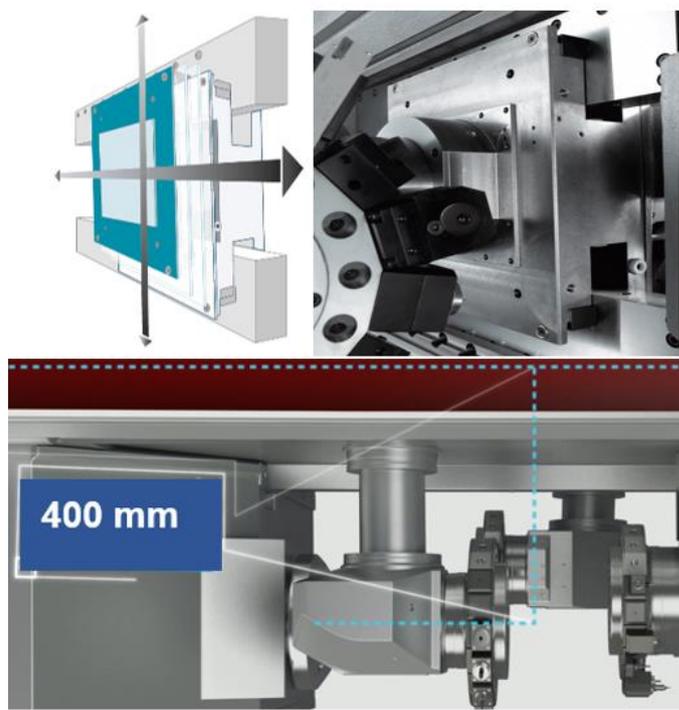


図 5. C シリーズのキネマティックスライド(上)、キネマティックスライドとタレットヘッドの距離(下)

3. 1. 2. 難削材で切込み深さ 6mm を実現

キネマティックスライドにより、リニアガイドからの突き出し量を抑えた上下のタレットは、優れた動剛性を獲得している。切込み深さが大きい高負荷加工において、びびり振動が発生しにくい構造となっており、一般的な複合加工機と比較し、工具寿命が 30%向上すると定評がある。

特に難削材の高能率加工では、本タレットの動剛性が顕著にあらわれる。高耐食ステンレススチール鋼 (SUS316L) の六角材の粗旋削加工で、高切込み量 $a_p=6\text{mm}$ の高能率粗加工 (切削速度 $v_c=180\text{m/min}$ 、送り $f=0.35\text{mm/rev}$) を可能とし、 $\phi 32\text{mm}$ の内径加工では、 $f=0.27\text{mm/rev}$ の高速送り低切削速度 (切削速度 $v_c=130\text{m/min}$) で、良好な切りくずを生成する (図 6)。ユーザからは、加工時の音や振動が少ないこと、大きい切込み深さ・高速送りでも挽き目がきれいなことが高く評価されている。



図 6. SUS316L の六角材旋削面 (上、左下) と 6mm 厚の良好な切りくず (右下)

3.1.3. 片側切込み深さ 2mm の上下オフセット粗加工

一般的に仕上げ加工は、切込み量が $0.1\sim 0.3\text{mm}$ と限られるため、仕上げ工程においては、加工時間の短縮代が限られている。一方、粗加工の切込み深さはタレットの動剛性と速度・加速度特性に負うところが大きく、大幅な加工時間短縮が見込める。本機であれば、上下のタレットによるオフセット高能率粗加工で、片側切り込み 2mm が可能である (図 7)。一例として図 8 のエアスピンドルの場合、一般的な複合加工機のサイクルタイム 274 秒に対し、C シリーズは約半分の 144 秒で加工を完了する (図 7, 8)。

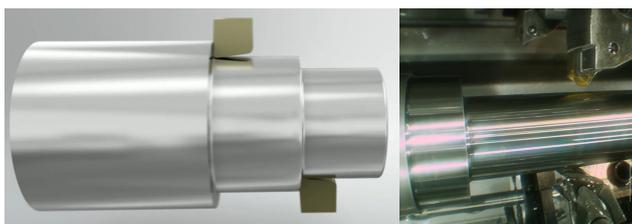


図 7. 上下のタレットのオフセット片側切込み 2 mm

(DOC)、快削鋼 (SUM22)、主軸回転数 $3,080\text{min}^{-1}$ 、送り速度 0.28mm/rev 、旋削長 54mm



図 8 : 加工事例

ワーク : エアスピンドル

材質 : 快削鋼 (SUM22)、バー材 $\phi 42\text{mm}$

サイズ : フランジ径 $\phi 38$ /ボディ径 $\phi 27 \times L58\text{mm}$

加工時間 : 144 秒

3.1.4. 早送り 60m/min、加速度 1G の 1.5 倍の高速動作

速度変化の激しさを示す加速度は、タレットに加わる力と質量の比 (外力/質量) で表され、質量が大きいタレットヘッドほど加速度が低下することになる。一般的なタレットは、Y 軸クイル、X 軸ユニット、そして Z 軸ユニットで構成され、軸が重なることで質量が増し、加速度が制限される。特に、質量が累積する第一軸の Z 軸ほど、加速度を上げにくくなる。

他方、C シリーズはワンスライド構造で、X、Z の 2 軸動作を可能にしており、ユニット数を減らしたことでタレットを軽量化している。一般的な複合加工機のタレットと比較し、約 180kg の質量を削減し、1.5 倍の速度、加速度特性を獲得している。特に、高速送りが重要な Z 軸では 60m/min 、加速度は 1G を獲得している。

3.2. 一般的な主軸の限定された加工能力

主軸の出力は、切削速度、送り速度、切り込み量、そして加工する被削材の比切削抵抗の積を時間あたりの商で表すものである。つまり、主軸の出力は 1 秒あたりに削られる切りくずの量と比例する。一般的な 6 インチクラスタレット型複合加工機の主軸出力は 15kW 未満のことが多く、時間あたりの加工可能な切りくず量が少ない。特に取り代の多い加工や難削材においては長い加工時間を要することになる。

3.2.1. 高出力の両主軸が生む 3 倍の旋削能力

C シリーズの主軸と背面主軸はコンパクト設計のビ

ルトインモータを搭載し(図 9)、最高出力 40kW の高い加工能力を実現する(図 10)。背面主軸の Z 軸高速送りは 60m/min と優れた速度特性を持ちながら、一般的な同サイズの国産複合加工機の主軸と比較し、約 3 倍の切りくず量を生成する旋削能力がある(図 11)。取り代が多い部品、難削材加工においては、大幅な加工時間の短縮を可能にする。

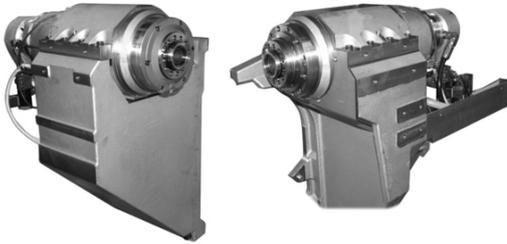


図 9. コンパクト設計高出力両主軸

C シリーズ 両主軸仕様	主軸		背面主軸	
	出力 [kW]*	回転数 [min ⁻¹]	出力 [kW]*	回転数 [min ⁻¹]
C100	29	7,000	19	7,000
C200	32	6,000	32	6,000
	40	3,500	40	3,500
C200 tandem	2x25	2x4,500	2x25	2x4,500

図 10. C シリーズ主軸仕様 (*40%ED)

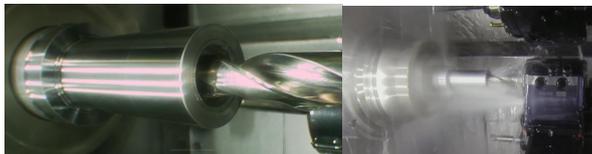


図 11. 高速深穴加工

快削鋼(SUM22) 外径φ27mm、主軸回転数 3,500min⁻¹、送り速度 0.12mm/rev、旋削長 67mm、ノンステップ、高圧クーラント 8MPa

3.3. 一般的な同時加工の制約

加工時間を短縮する大きな要素は、高能率の粗加工と同時加工があげられる。国内のタレット式複合加工機は、対向 2 主軸 1 タレットと対向 2 主軸 2 タレットが主流である。タレット数に応じた同時加工が可能となり、2 タレットの場合、2 箇所同時加工により、サイクルタイムが短縮される。一般的なタレット構造の機械では、切込み深さを増やすことで、上部タレットのびびり振動が下部タレットに影響を与えてしまうこと

がある。特に旋削面が重要な仕上げ加工においては、同時加工能力が活かされていないことも多い。

3.3.1. 卓越した同時加工能力で加工時間を 1/6 に短縮

C シリーズは上下の 2 タレットに標準で Y 軸を搭載している。フライス加工に不可欠な Y 軸を付加することで、同時加工に対応するだけでなく、複雑形状への対応力が格段に向上する。本シリーズの対向 2 主軸の 3 タレット仕様であれば、最大 3 箇所の個別制御による同時加工、平行対向 4 主軸であれば、6 箇所同時加工を実現する。

また、一般的な複合機の下部タレットが主軸側だけの加工を担う仕様が多い中、インデックス社の複合加工機は例外なく、背面側でも加工ができるように配慮され、同時加工を意識した設計となっている(図 12)。

対向 2 主軸の 1 タレットと 2 タレットの国産複合加工機と比較し、3 タレットの本機は同時加工を最大限活用し、サイクルタイムを最大 1/6 に短縮することができる(図 13, 14, 15)。

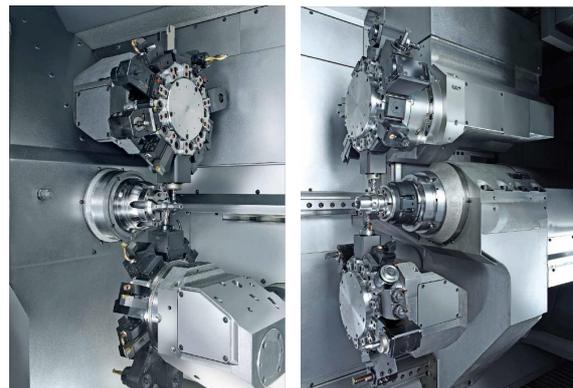


図 12. 背面側の加工も担う Y 軸搭載下部タレット(右)



図 13: タレット数別の加工時間 1

材料: ステンレススチール
バー材

サイズ: Ø 42 x L52 mm

加工時間: 216 秒(C シリーズ)

480 秒(国産 2 タレット)

660 秒(国産 1 タレット)



図 14：タレット数別の加工時間 2
 材料：アルミ合金
 バー材
 サイズ： \varnothing 39 x L60 mm
 加工時間：64 秒 (C シリーズ)
 300 秒 (国産 2 タレット)
 420 秒 (国産 1 タレット)

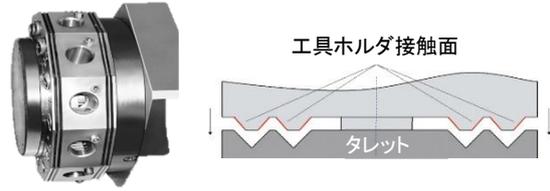


図 16. 特許 W 溝インターフェース



図 15：タレット数別の加工時間 3
 材料：真鍮
 バー材
 サイズ： \varnothing 24 x L43 mm
 加工時間：45 秒 (C シリーズ)
 160 秒 (国産 2 タレット)
 280 秒 (国産 1 タレット)

4. 多品種化に対応する機上段取り時間の削減

多品種化する複雑形状部品を、短時間で加工するためには、機械のダウンタイムを抑えることも肝要である。生産の後、すぐに異なるワークの加工を開始するため、メカとソフトウェアのセッティングを効率的に変更する必要がある。インデックス社特許 W 溝インターフェースと Virtual Machine (バーチャルマシン) が C シリーズのダウンタイムを削減する。

4.1. 短時間の着脱と再現性に優れる特許 W 溝工具ホルダインターフェース

インデックス社独自のクイックチェンジ・システムにより、ツールホルダはタレットヘッドの W 溝基準で、高い再現性をもって位置決めされる (図 16)。ホルダはたった 1 本のボルトで固定できるため、僅か 30 秒ほどで交換でき、機外でプリセットした刃物の情報を利用し、直ちに生産に移行できる。ATC 機能がないタレット型複合加工機において、繰り返し誤差を抑え、且つ工具交換を短時間で完了させることの重要性は高い。

4.2. 機外 PC でプログラムを最適化

C シリーズはインデックス社のプログラム兼シミュレーションソフトウェア Virtual Machine に対応している。機上の操作画面と全く同じ画面を機外のパソコンで再現し (図 17)、機外で加工プログラムをシミュレーションしておくことで、最適化したプログラムを直ちに加工機に展開することができる。両主軸のサイクルタイム平均化、同時加工の追求に加え、干渉チェックでは透過機能を用いて内部加工も細部に渡り確認可能だ。機上でのプログラムの最適化や干渉チェックを、機外パソコン作業に置き換えることで、多品種少量生産への柔軟性を高めている。

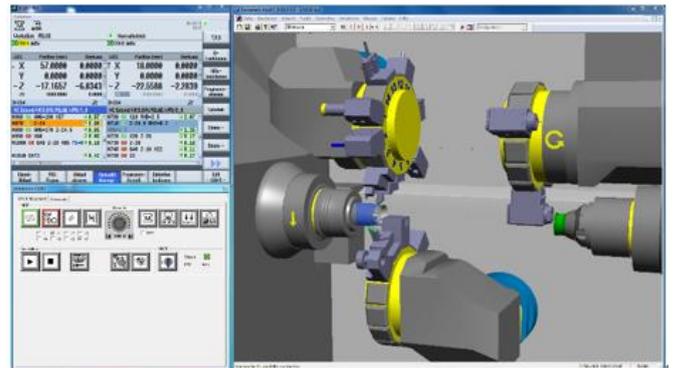


図 17. 機上の操作画面(上)を機外 PC(下)で再現

5. 精度の安定性を生むコンパクトな加工領域と冷却用機内配管

連続運転時の機械の熱変位を抑えるポイントは、コンパクト設計であること、そして急激な温度変化と局所的な温度分布を防ぐことである。金属スケールの線

膨張係数は $11\mu\text{m}/\text{mK}$ で、僅か 1°C の温度変化で 1m あたり $11\mu\text{m}$ の膨張収縮が発生する。本機は、一般的な複合加工機と比較し、十分な加工領域を確保しながらも、スライドと刃物距離を約 50% 短くし、膨張収縮の影響を抑制した。

機内の熱源になる両主軸内部に組み込まれた循環式油冷配管が、機械の熱変位を抑える。機外のチラーから送り込まれる水溶性クーラント液は、配電盤の冷却と機内循環の油冷却の役割を担っている(図18)。

Cシリーズと同サイズの国産機も利用しているユーザからは、精度の安定性が高く評価され、所定の加工精度の場合、本機だけは暖機運転不要のコールドスタートで量産加工をしている。

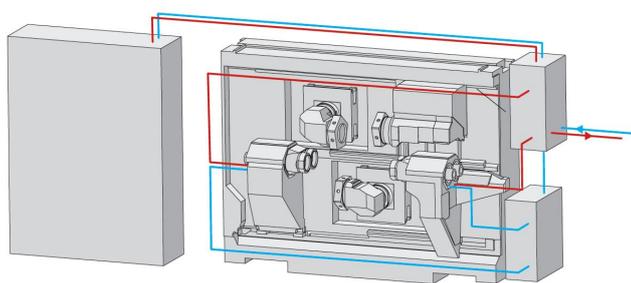


図 18. Cシリーズ冷却用配管イメージ

6. おわりに

インデックス社Cシリーズは優れた動的特性のタレット、高出力両主軸、卓越した同時加工能力を持つタレット型複合加工機である。高速加工の能力を活かし、国産機3台で生産していた部品を、1台でカバーするポテンシャルを持つ。本機で複雑部品の低コスト生産を実現し、高付加価値部品を製造する日本のものづくりに貢献していきたい。