

# CNC 旋盤の加工空間内に発生する空気流の挙動観察

川守田 智\*・今田 良徳

## Observation of Airflow within Machining Space of the CNC Lathe

Satoshi KAWAMORITA\* and Yoshinori KONDA

(2001年11月30日受理)

In order to solve some problems caused by the airflow within a machining space of CNC lathe, the airflow is observed by means of the tuft and tracer methods. Flow visualizations are carried out when the rotating directions of the chuck are clockwise (CW) and counter clockwise (CCW) and also chuck rotating speeds are 2000, 3000, and 4000  $\text{min}^{-1}$ . The investigation shows some characteristic airflow within the machining space, e.g. an airflow goes to the direction of tailstock through a surface of panel formed the machining space after the airflow from rotating chuck strikes on the panel, vortex-like flow occurs near the door side and the slant cover panels.

### 1. 緒言

工作機械の高速化を実現するための技術課題は一般に、(1)主軸系の高速化、(2)送り駆動系の高速化、(3)高速対応のツーリング機構の開発、の3つに分類される<sup>(1)</sup>。これら基幹技術のうち、(3)高速対応のツーリング機構の開発に関する技術課題の一つに、工作機械と工作物のインタフェースとして重要な機能を果たす工作物取り付け具の高速化対応が挙げられている。これまで、例えば爪チャックに対する遠心力の影響についての研究及び対策がなされ、遠心力補正機構を備えた高速回転対応爪チャックが実用化されている。また、爪チャックが空气中を高速で回転運動した場合に生ずる空力音や空気流に関する課題に対しては、今田や割澤によって調査・報告<sup>(2),(3)</sup>がなされ、新しい爪チャックの設計概念を示唆する知見が得られている。

しかしながら、これらの研究は開放空間における爪チャック周辺での挙動観察であることから、今日のCNC旋盤等の様な機械全体をカバーパネルで覆われている閉鎖的な空間で、爪チャックを高速で回転させた場合に発生する種々の問題を予測するには難しいと考えられる。

CNC旋盤の加工空間内で発生する空気流では、(1)切削油剤や切屑の飛散、(2)切削油剤や切屑の隙間への浸透、(3)切屑の堆積、(4)切屑の工作物への絡みつき、といった現象を引き起こすと考えられる。これらの現象は結果的に工作物の加工面品位へ影響を与えるだけにとどまらず、生産効率、作業環境の快適性および安全性に、悪影響を与えると考えられる。

この様なことから本研究は、空気流を考慮に取り入れた加工空間の形状設計の基礎資料を得るため、CNC旋盤の加工空間を想定したモデルを作成し、そこで発生する空気流を表面タフト法とトレーサ法の2種類の可視化法により空気流の挙動観察を行なった。そして、そこで発生している空気流の性質を明らかにするとともに、チャックの回転数や回転方向が加工空間内に生ずる空気流の挙動に与える影響を検討したものである。

### 2. 実験装置および方法

本研究では、爪チャックが回転した際に発生する空気流を、様々な方向から明確に観察を出来るようにするため、CNC旋盤(森精機製SL-150)をモデルにした図1の様な加工空間を想定した装置で実験を行なった。この装置は、主軸頭、CNC旋盤の加工空間を形成する透明アクリル板、並びにスラントカ

\* 秋田高専専攻科学生

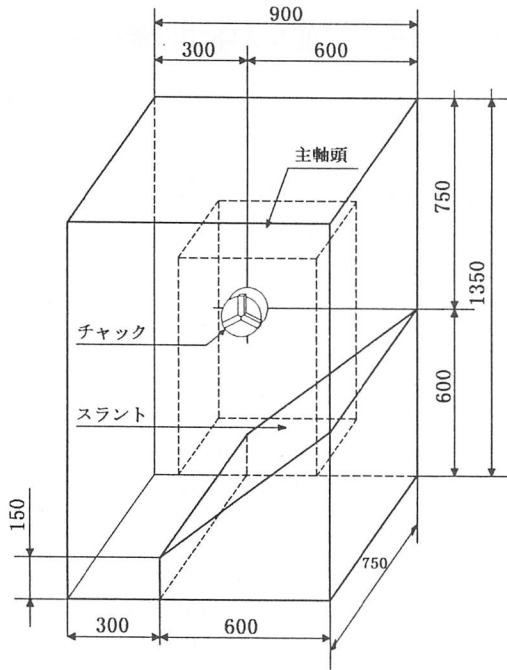


図1 実験装置（加工空間モデル）

バーパネルから成り、チャックの回転によって発生する空気流を外部から容易に観察できるようになっている。ここで説明の便宜を図るため、加工空間内部の各面をそれぞれ図2のように定義し、以下ではこれらの呼称によって記述している。

加工空間壁面上の空気の流れを観察するために行なったタフト法では、図3のような見かけの直径0.15 mm、長さ20 mmの絹製のタフトを、黒色のラシャ紙に25 mm 間隔で格子状に装着し、これを加工空間内の各面に貼り付けて空気流の観察を行なった。

加工空間全体の空気流を観察するために行なったトレーサ法では、平均直径2.3 mmの発泡スチロール球(1個当りの重さ約0.922 mg)、並びにドライアイスが気化する際に発生するスモークの2種類をトレーサとして用いた。発泡スチロール球を用いたトレーサ法では、予め底面パネルに発泡スチロール球を均一にばらまき、その後チャックを回転させることによって、発泡スチロール球を加工空間内に散逸させ、空気流の可視化を行なった。また、ドライアイスのスモークを用いた実験は、加工空間下方にスモークを堆積させた後、同様に散逸させることによって空気流の可視化を行った。さらに、局所の流れ状態を把握するため、発生している空気流に影響を及ぼさない加工空間壁面の数カ所に穴を開け、そこから直径10 mmのアルミパイプを介してトレーサを注入し、空気流の挙動を観察した。

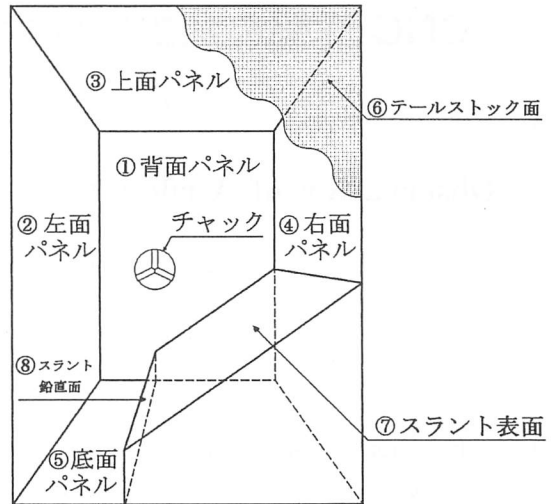


図2 加工空間各部の名称

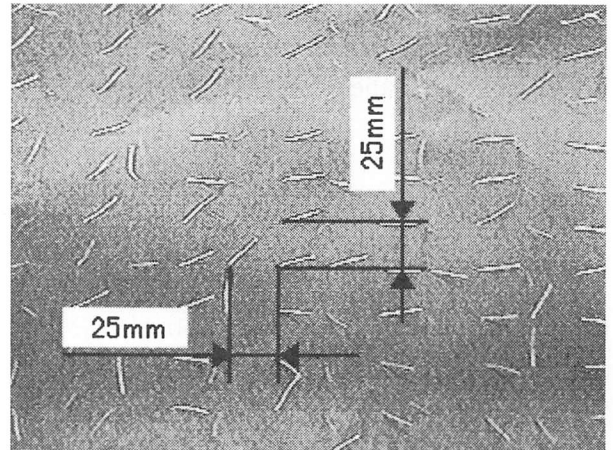


図3 タフト

以上の方法により加工空間で発生している空気流を可視化し、これを CCD デジタルビデオカメラ (SONY 製 DCR-VX1000) で撮影すると同時に、目視による詳細な観察・記録を行なった。

実験は主軸回転数を2000, 3000, 4000 min<sup>-1</sup>の3種類とし、チャックの回転方向をチャックに向かって反時計方向 (以下 CCW と記述) 及び時計方向 (以下 CW と記述) の場合について行なっている。

さらに、実験結果を整理するに当たり、チャック直径0.165 m を代表長さとして式(1)により主軸回転数をレイノルズ数として無次元化の上、整理を行なっている。

$$Re = v \times d / \nu \dots\dots\dots(1)$$

ここで、v はチャック本体の外周速度 (m/s)、d はチャック本体直径 (m)、ν は空気流の動粘性係数 (m<sup>2</sup>/s) である。

### 3. 実験結果および考察

図4は、 $Re = 190 \times 10^3 (2000 \text{ min}^{-1})$ 、チャックの回転方向がCCWの場合における、加工空間壁面上および加工空間内に発生している空気流をそれぞれ、表面タフト法、トレーサ法により可視化した写真の一例である。本研究では、先に述べた様に、可視化実験をデジタルビデオカメラで撮影すると同時に、肉眼での詳細な観察・記録を行なっている。そして、これらの記録を基に、加工空間内および加工空間壁面上で発生している空気流を、図6の様に整理している。

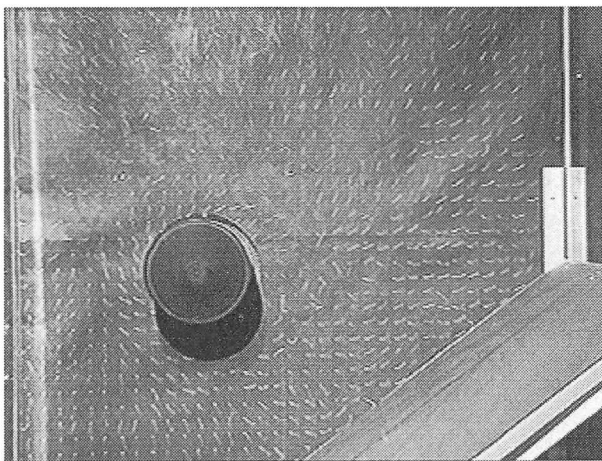


図4 表面タフト法による可視化例  
( $Re = 190 \times 10^3 (2000 \text{ min}^{-1})$ , CCW)

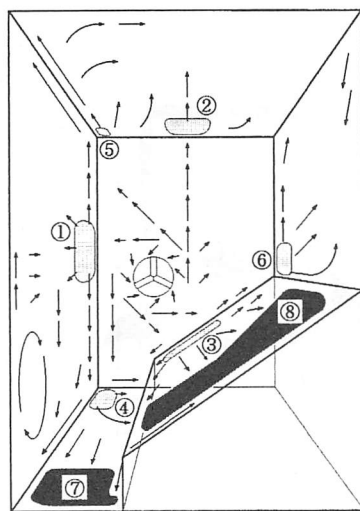
#### 3. 1 加工空間で発生する空気流の挙動

さて、図5は  $Re = 190 \times 10^3 (2000 \text{ min}^{-1})$ 、チャックの回転方向がCCWの場合において、加工空間壁面上に発生する空気流をタフト法により可視化を行ない、空気流の挙動を整理したものである。図中の矢印は、その際に得られた空気流の方向を示している。

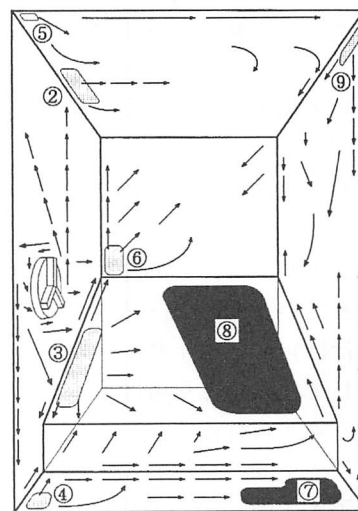
チャック近傍の背面パネル壁面を見ると、チャックの回転方向を向きながらチャックの回転方向へつれられるような流れが見られる。これは、先の報告<sup>(3)</sup>から、チャック本体の外周面に生じる渦によって発生する現象と考えられる。そして、その箇所のチャック半径方向外側の領域では、チャックの接線方向に向かう流れ(以下、接線方向流れと呼称)が確認された。

その後、接線方向流れは、背面パネルと直交する左面パネル、上面パネル、右面パネル、スラント表面、並びに底面パネルへと到達する。このうち、左面パネル、上面パネル、スラント表面上における図中①、②、③の箇所では、流れ方向を特定することが難しいほどタフトの大きな乱れが観測され、それらの箇所を中心とする放射状の流れ(以下、放射状流れと呼称)が生じている。これらの位置は、チャックからの接線方向流れが各々の面に対して垂直に到達する箇所である。

これらの放射状流れのうち、背面パネルに沿う流れ(各パネルにとって背面パネル近傍の流れ)には、背面パネルからの接線方向流れが合流する。例えば、左面パネル上の①を中心とした流れにおいては、左面パネルと背面パネルが接している箇所を通る流れに、背面パネル上を流れてきた接線方向流れが合流



(a) テールストック面側からの観察



(b) 左面パネル側からの観察

図5 加工空間内壁面上の空気流挙動  
( $Re = 190 \times 10^3 (2000 \text{ min}^{-1})$ , CCW)

しながら底面パネル方向と上面パネル方向へと向かう。そして底面パネルには④を、上面パネルには⑤を中心とした新たな放射状流れを発生させる。同様に、スラント表面上の③を中心とした放射状流れにおいても、背面パネルとスラント表面が接する箇所を通過して右面パネルへ向かう流れに、背面パネル上を流れてきた接線方向流れが合流し、右面パネル上の⑥の位置に新たな放射状の流れを発生させる。

一方、③を中心に広がった放射状流れは、スラント表面上を通過してテールストック面方向へ向かう。しかし、その流れはスラント表面中央へさしかかった所で突如、タフトによる明確な流れ方向を確認できなくなり、流れが存在していないかのような現象を示す。図6はその様子をタフト法にて観察したものであるが、図中の実線で囲まれた領域では、タフトがほとんど静止していた。この領域は図6中の⑧に相当する。

さて、④を中心に広がった新たな放射状流れは、底面パネル上を通過してテールストック面方向へ流れる。ここで、⑦の領域でもタフト法による観測で特異な現象が見られ、発泡スチロール球を用いたトレーサ法による実験を行なった所、発泡スチロール球が⑦の領域に堆積する現象が見られた。

上面パネル上の⑤を中心に広がった新たな放射状流れのうち、上面パネルと左面パネルが接する箇所を通過してテールストック面へ向かう流れがそのままテールストック面へ衝突し、新たな放射状流れの⑨をテールストック面に形成している。

スラント鉛直面をみると、この面と接している底面パネル上の④の箇所から流れ込んでくる放射状流れにより、スラント鉛直面と底面パネルの接している箇所をテールストック面方向へ向かう流れが、またスラント鉛直面上を上面方向へ向かう流れがそれぞれ発生している。

右面パネル上の流れは、⑥の箇所を中心とする放射状流れが基点となっている。一方で、この面のテールストック寄りでは、この流れと逆向きになる流れが観測されているものの、その範囲のタフトが示す方向性にはばらつきが生じ、チャックからの距離がかなり離れていることを考慮すると、その流れの勢いは弱いと考えられる。

ここで、加工空間の全体的な流れを把握するために、ドライアイスのスモークを使用してトレーサ法での実験を行なった。図7は、加工空間内で発生する空気流を観察の上、得られた記録を基に整理したものである。チャック周辺で発生する空気流が、背

面パネルとその面に接している左面パネル、上面パネル、右面パネル、スラント表面、底面パネルの上を沿う様に流れてテールストック面方向へと向かい、その後、加工空間内を通過してチャック方向へ向かう流れへ変化することを確認できる。また、底面パネル上を流れてきたトレーサが図6中の⑦の箇所ですら上面パネル方向へ立ち上り、加工空間内部を通過してチャック方向へ向かうことも観測されている。

背面パネルと対面するテールストック面上の流れは、背面と接する左面パネル、上面パネル、右面パネル、スラント表面、底面パネルから流れてくる空気流の影響を受けながらも、この面では図5中の⑨を中心とする放射状流れが基点となっている。しかしながら、面の下方では、この⑨の放射状流れと逆

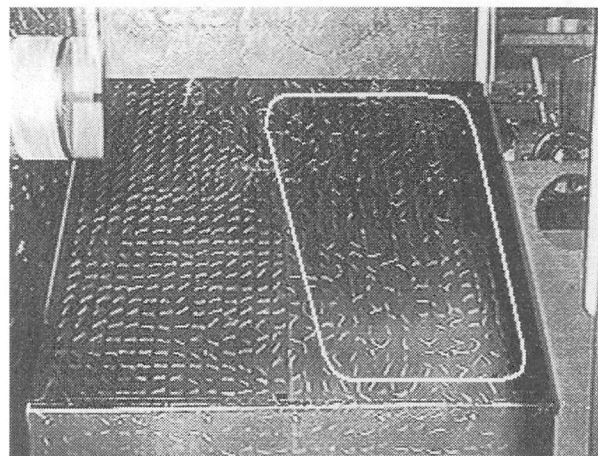


図6 表面タフト法による  
スラント表面上の空気流の挙動  
( $Re = 190 \times 10^3(2000 \text{ min}^{-1})$ , CCW)

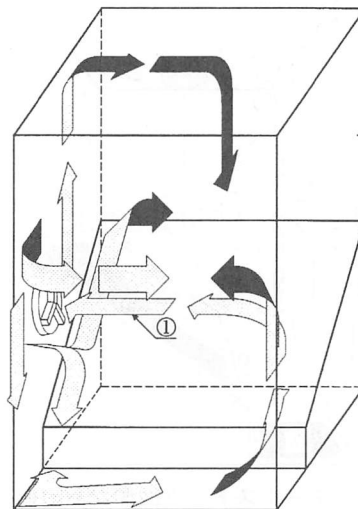


図7 加工空間内における空気流の挙動  
( $Re = 190 \times 10^3(2000 \text{ min}^{-1})$ , CCW)

CNC 施盤の加工空間内に発生する空気流の挙動観察

の流れ方向を示す流れが観測されている。これは先のドライアイスのスモークによるトレーサ法の実験から推測し、底面パネル上の⑦の箇所で立ち上る空気流が、テールストック面上の流れへ影響を与えたものであると考えられる。

3. 2 レイノルズ数の影響

図8は  $Re = 385 \times 10^3$  ( $4000 \text{ min}^{-1}$ )、チャックの回転がCCWの場合における、加工空間壁面上に発生する空気流をタフト法により観察を行ない、空気流の挙動を整理したものである。

$Re = 190 \times 10^3$  ( $2000 \text{ min}^{-1}$ ) の場合と同じく、チャックの回転によりチャック周辺で発生する接線方向流れは、その流れが垂直に衝突する左面パネル、上面パネル、スラント表面に、それぞれ①、②、③の箇所を中心とする放射状流れを発生させる。これら3箇所が発生する放射状流れは、①が底面パネル上に④、および上面パネル上に⑤を、③が右面パネル上に⑥をそれぞれ発生させる。一方、上面パネル上の⑤を中心として発生する放射状流れが、テールストック面上の⑨の箇所へ再び放射状流れを生じさせる。これらの挙動は  $Re = 190 \times 10^3$  ( $2000 \text{ min}^{-1}$ ) の場合とほぼ同じであり、背面パネルに近い領域における空気流の方向性は、レイノルズ数の影響をほとんど受けないと考えられる。

背面パネルと対面する形を取るテールストック面は、⑨での放射状流れを基点とすることに変化は生じていないが、レイノルズ数の増加によって放射状

流れの一部がスラント表面まで到達し、スラント表面上に⑩を中心とする新たな放射状流れを発生させている。

$Re = 190 \times 10^3$  ( $2000 \text{ min}^{-1}$ ) の場合のスラント表面で突如として流れが観測できなくなる図6中の領域⑧は、レイノルズ数が増加した場合においても同様に観測されているが、同じ面上に生じた⑩を中心とする放射状流れの影響により、その領域の大きさはスラント表面の中央方向へ狭めていることが分かる。さらに、この領域でのタフトは、レイノルズ数を増加させることによってわずかながら動き出すとともに、タフトが浮き上がってスラント表面から上面方向を向く挙動を見せている。すなわち、この領域では、チャック周辺からテールストック面方向へスラント表面上を沿って流れる空気流が、⑩の箇所からの放射状流れとぶつかり合うことにより、流れの勢いが弱まったり、一方でスラント表面の上方へ向かう流れが発生したりする箇所と推測できる。

さて、タフトが大きく乱れるといった現象を示す底面パネル上の領域⑦の大きさは、レイノルズ数の増加とともに小さくなっている。ここで、発泡スチロール球によるトレーサ法によって、この箇所を可視化したものを図9に示す。 $Re = 190 \times 10^3$  ( $2000 \text{ min}^{-1}$ ) では、発泡スチロール球が底面上の⑦の領域に堆積するだけであった。しかし、その箇所はレイノルズ数の増加によって渦の様な流れや、流れのぶつかり合いによるよどみを発生するようになる。また、溜まっていたトレーサがこの箇所から上面方向

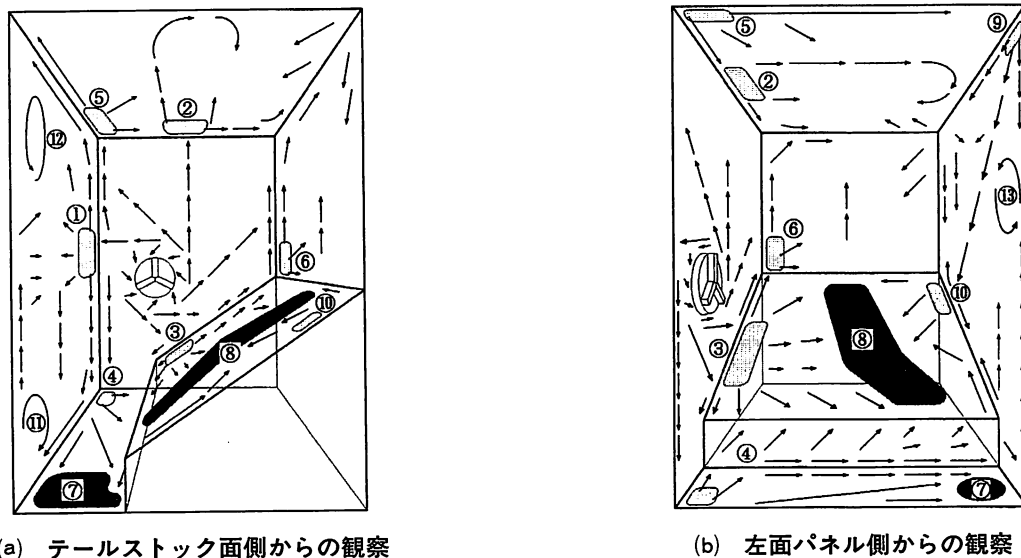


図8 加工空間内壁面上の空気流挙動  
( $Re = 385 \times 10^3$  ( $4000 \text{ min}^{-1}$ ), CCW)

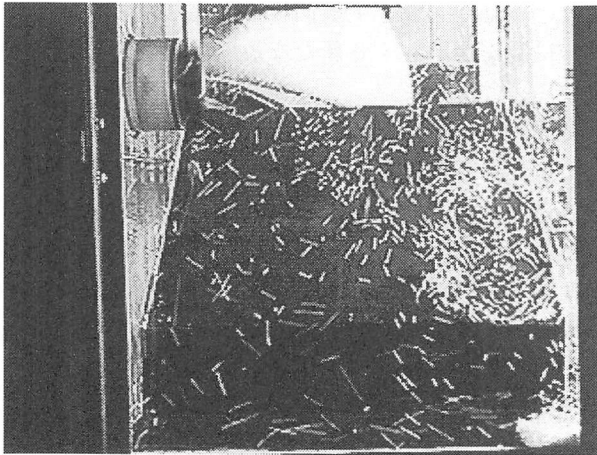


図9 トレーサ法による  
底面パネル上方の流れの挙動  
( $Re = 385 \times 10^3 (4000 \text{ min}^{-1})$ , CCW)

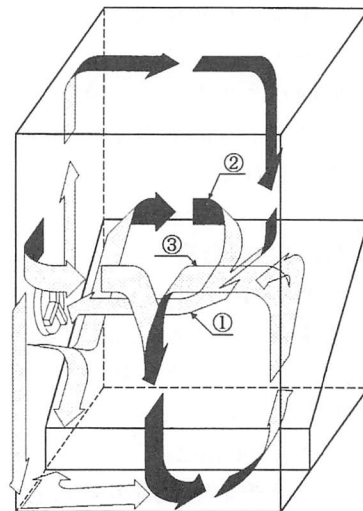


図10 加工空間内における空気流の挙動  
( $Re = 385 \times 10^3 (4000 \text{ min}^{-1})$ , CCW)

へ上昇することも確認された。

ところで、図8中の左面パネル並びにテールストック面を見るとレイノルズ数の増加によって渦の様な流れ(①, ②, ③)が出現していることが分かる。左面パネルに生じている①の渦は、底面パネル上の⑦の位置で発生している空気流が上面方向へ上昇することによって、また②の渦においては、上面パネル上の⑤で広がる放射状流れがテールストック面へ衝突して④を形成する際に生じるものと考えられる。一方、テールストック面に生じている③の渦は、この面上の⑨で広がる放射状流れが逆向きの流れと衝突する事によって発生すると推測される。

図10は、発泡スチロール球を使用したトレーサ法により、加工空間内で発生する空気流を観察し、整理したものである。レイノルズ数の増減の変化に関わらず、チャック周辺で発生した空気流が背面パネルに接する左面パネル、上面パネル、右面パネル、スラント表面、並びに底面パネルの面上を流れ、テールストック面へ到達後、加工空間内部を通過してチャック方向へ向かう流れ①となることが分かる。一方で、 $Re = 190 \times 10^3 (2000 \text{ min}^{-1})$ では見られなかった②, ③のような新たな流れの様子が確認された。

また、トレーサ法で観測した加工空間全体の流れの挙動も、表面タフト法によって得られた加工空間壁面上の流れの挙動と一致することが確認された。

### 3. 3 主軸回転方向の影響

図11は、 $Re = 385 \times 10^3 (4000 \text{ min}^{-1})$ 、チャックの回転方向がCWの場合において、加工空間壁面上に発生する空気流をタフト法により可視化を行ない、

空気流の挙動を整理したものである。

まず、チャック近傍を見ると、CCWの際と同じように、チャックの回転方向を向きながらチャックの回転方向につれ回るような流れが見られ、その箇所はチャック半径方向外側の領域においてはチャックの接線方向に向かう流れが確認された。その後、接線方向流れは、その流れと垂直に衝突する左面パネル、上面パネル、スラント表面上の①, ②, ③の箇所へ到達し、各面上にそれらを中心とする放射状流れが発生する。また、回転方向の違いは、接線方向流れにとって垂直に衝突する位置を変えている。CWにおける接線方向流れの衝突位置をCCWと比較すると、左面パネル上の①の箇所は底面パネル寄りへ、上面パネル上の②の箇所は左面パネル寄りへ、そしてスラント表面上の③の箇所は右面パネル寄りへそれぞれ移動している。

さて、①を中心とした放射状流れはCCWの場合と同様に、上面パネルへ②を、底面パネルには④を中心とする新たな放射状流れを発生させる。ところが、上面パネル上の②の箇所は先に述べた接線方向流れが衝突する箇所と同じであり、CCWの場合と比べ、タフトの乱れが大きくなっていることが観測された。①を中心とする放射状流れのうち、左面パネルと背面パネルの接する箇所を通る流れが、その流れへ近づいた接線方向流れと合流し、2つの流れを重ね合わせた状態で②の位置へ向かうため、より乱れが大きくなると考えられる。一方で、スラント表面上の③を中心とした放射状流れは、右面パネル上の⑤へ新たな放射状流れを発生させている。

上面パネル上では、②の箇所を基点にした放射状

CNC 施盤の加工空間内に発生する空気流の挙動観察

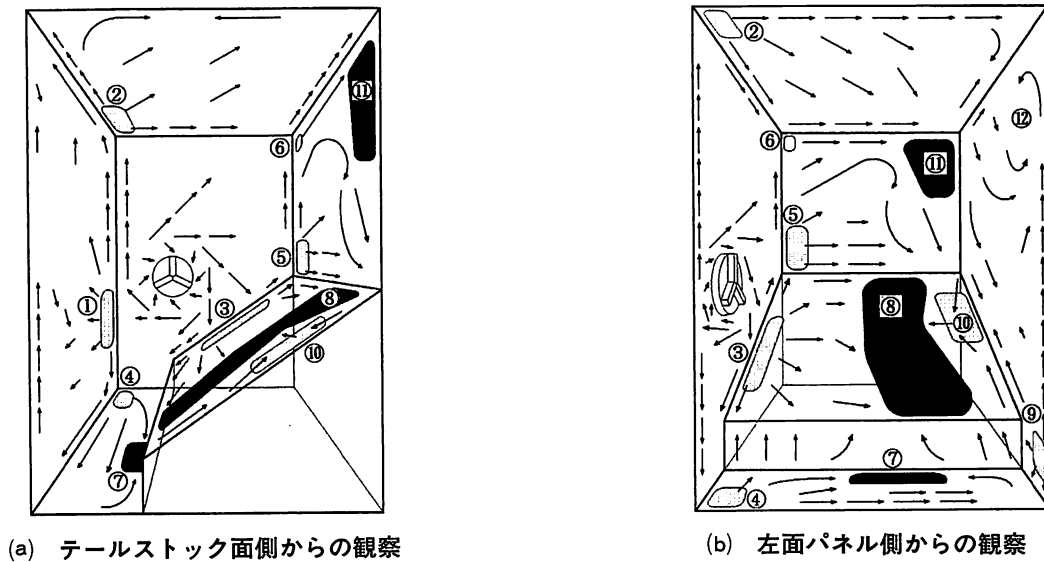


図11 加工空間壁面上の空気流の挙動  
( $Re = 385 \times 10^3 (4000 \text{ min}^{-1})$ , CW)

流れが広がっている。前述の様に、この放射状流れは2つの流れの成分が合成されたことにより、そこで広がる流れの勢いがCCWに比べ増している。そのため、この放射状流れの一部の背面パネルと上面パネルの接する箇所を通過して右面パネルへ向かう流れが、⑥へ衝突した後、新たな放射状流れを形成する。一方、左面パネルと上面パネルの接する箇所を通過してテールストック面へ向かう流れも存在し、これはテールストック面へ衝突することなく、また放射状流れも形成しない。

底面パネル上における流れは、④を中心とした放射状流れが左面パネルと底面パネルが接する箇所を通過してテールストック面上の⑨へ衝突し、新たな放射状流れを形成している。これは、左面パネル上で①を中心に広がる放射状流れが、CCWの場合よりも下方へ移動したことにより、底面パネル上の④で広がる放射状流れの勢いが増したためと考えられる。

テールストック面では、⑨を中心とする放射状流れの一部が隣接する底面パネルへと流れ込むことにより、CCWで確認された渦の様な流れや、流れのぶつかり合いによるよどみの発生位置を⑦へ移動させる。さらに、この放射状流れ⑨の一部はスラント表面とテールストック面の接する箇所へ流れ、スラント表面上の⑩の箇所で右面パネル方向からの流れと衝突している。

スラント表面では、CCWの場合と同じように、面上に流れ方向が確認できない⑧の箇所の存在を確認

することが出来る。また、テールストック面寄りでは、その領域を狭める働きをしている⑩の発生も同様に確認される。しかし、CCWにおける⑩は、テールストック面上部に発生している放射状流れの一部が、スラント表面上へ衝突することによってそれを形成していることに対し、CWの⑩は、右面パネルから流れて来る空気流とテールストック面上の⑭から流れて来る空気流が、お互い衝突することによって発生する違いがある。CCWとCWとでは⑩の発生原因が全く異なるものであり、一概にスラント表面上の流れ挙動は非常によく似ていると言えないものの、スラント表面上の領域⑧の大きさを狭める働きは共通している。

右面パネルでは、⑤と⑥の箇所を基点とした放射状流れが広がっており、その流れは⑪の領域周辺を接する様に迂回した後、スラント表面とテールストック面の接線箇所を通過してスラント表面の⑩の箇所へと向かう。⑪の領域では、タフトが突然流れ方向を示さなくなり、流れが存在していないかのような挙動を見せる。前述の通り、スラント表面の⑧の箇所でも突如として流れ方向が確認できなくなる現象が存在した。⑪での現象はこれとよく似た様子を示している。

図12は、発泡スチロール球によるトレーサ法により、加工空間内で発生する空気流を観察し、整理したものである。加工空間内の流れがCCWに比べて複雑になり、加工空間の上方では旋回する流れ①になっていることが分かる。また、底面パネルの図11

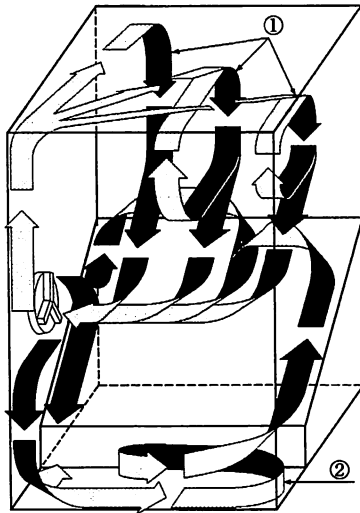


図12 加工空間内における空気流の挙動  
( $Re = 385 \times 10^3 (4000 \text{ min}^{-1})$ , CW)

中⑦の領域に当る箇所では、螺旋の様な流れ②を示した後、スラント表面へ滑り込む様に流れていることも見てとれる。回転方向の変化は、加工空間内における流れの挙動を大きく変えるものであると考えられる。

#### 4. 結 言

本研究は、空気流対策を取り入れた加工空間の形状設計を念頭とした基礎資料を得るため、CNC旋盤の加工空間を想定した装置により、そこで発生する加工空間壁面上と加工空間内におけるそれぞれの空気流の挙動を2種類の可視化法によって観察を行なうとともに、チャックの回転数や回転方向が、加工空間内に生ずる空気流の挙動にどのような影響を与えるかを検討したものである。本実験範囲で得られた主な結果を以下に示す。

(1) チャックの回転により、チャック周辺ではチャックの半径方向外側の領域において、チャックの接線方向に向かう流れが発生する。その後、幾つかの箇所に放射状流れを形成しながらパネル壁面上を沿って流れ、テールストック面へ到達後、加工空間内部を通りながらチャック方向へ向かう流れへと変化する。

(2) チャック周辺で生じる接線方向流れは、その流れと垂直方向にある面に放射状流れを発生させる。その放射状流れは面と面の接線箇所を通り、流れの先にある面へ新たな放射状流れを発生させる。

(3) レイノルズ数の増加による影響は、加工空間内における空気流の勢いを増幅させるだけではなく、テールストック面とテールストック面寄りの左面パネル、上面パネル、右面パネル、底面パネル、スラント表面のそれぞれの面上を流れる空気流の流れ方向に、変化を与える。

(4) 加工空間には空気流が溜まる箇所が存在し、工作物を切削する際はその箇所に切屑や切削油を堆積すると考えられる。

(5) 主軸の回転方向をCWとした場合、空気流は加工空間内を大きく旋回する傾向が強くなり、一方で、テールストック面またはその面近くの面へ渦を発生させるなど、加工空間内における流れは複雑になる。

#### 参考文献

- (1) 堤 正臣, 工作機械の高速化を実現する重要技術, 日本機械学会論文集(C), 60-57 (1994), 2894-2899.
- (2) 今田良徳, 割澤伸一, 門脇義次, 伊東誼, 旋盤チャック回りに発生する空気流の挙動, 日本機械学会論文集(C), 63-613 (1997), 3306-3312.
- (3) 今田良徳, 割澤伸一, 門脇義次, 伊東誼, 旋盤チャック爪近傍で生ずる空気流の観察, 日本機械学会論文集(C), 65-637 (1999), 3832-3838.
- (4) 割澤伸一, 清川丈, 伊東誼, 旋盤爪チャックによる空力音発生機構の検討とその低減対策, 日本機械学会論文集(C), 66-649 (2000), 3174-3180.
- (5) 浅沼強編, 流れの可視化ハンドブック, 朝倉書店, (1977), 143-313.
- (6) JISハンドブック 工作機械, 日本規格協会, (1982).
- (7) 日本機械学会編, 機械工学便覧「流体工学」, 日本機械会(1990).