

第1章 はじめに

1.1 背景

断切金箔の仕上げ工程において、一定寸法の商品とするために、打紙から取り出した金箔を箔合紙（はくあいし）と呼ばれる和紙の間に一枚ずつ挟み込み、1000枚単位の箔と箔合紙の積層体を作り、一定寸法の木（又はアクリル）製のブロックを載せ、これを足で踏み押え、薄刃（うすば）と呼ばれる特別の包丁（図 1.1）で4面を順次切断する。このとき、ブロックの踏み加減、薄刃にかける力加減など、人間の5感を最大限必要としている。さらに、こうした一連の作業には体力を必要とし、近い将来において、職人の高齢化により従来型の作業の継続が危惧され、業界から、省力化と合理化を可能とする裁断機の開発が強く望まれている。



図 1.1 職人が使用している刃（単位[mm]）

1.2 金箔の切断の難しさ

職人が行っている裁断作業の様子を図 1.2 に示す。この裁断作業を自動化する難しさは、次の点にあると考えられる。

- ①積層体を押し付けて圧縮するほど裁断しやすいが、押し付けすぎると、間に挟まっている金箔に合紙の模様がついてしまう。
- ②直線状のカッターやノコギリ状の刃で引いて切ると、金箔の端を引っかけることにより破れが生じる可能性がある。
- ③厚い紙の積層体を上方から大きな力で押して切るという方法が他にあるが、金箔の端が合紙の端にめり込みくっついてしまう可能性がある。
- ④積層体の4面を、刃が斜めに入らないよう、精度良く垂直に裁断する必要がある。

1.3 研究開発の目的

以上の背景から、金箔と箔合紙の積層体の4面を自動で切断する裁断機の開発を研究目的とする。過去2年間の研究開発において、積層体をきれいに裁断できる刃物やその切断条件を、顕微鏡による切断面の観察などにより、ある程度明らかにした。また、積層体の一面を切断する自動切断装置を試作した。その際、円形刃の回転と直線運動を連動さ

せ、水平面に対して少し斜めに切り込んでいくことで、ある程度良好に切断できることが分かった。

本年度は、積層体一面の自動切断装置のさらなる改良点の検討を行った上で、積層体四面を自動で裁断できる装置の設計・試作を完成させ、評価、改良を行う。できれば、軽量化やコスト、作業のしやすさなども考慮した設計まで推し進め、装置の完成を目指していく。

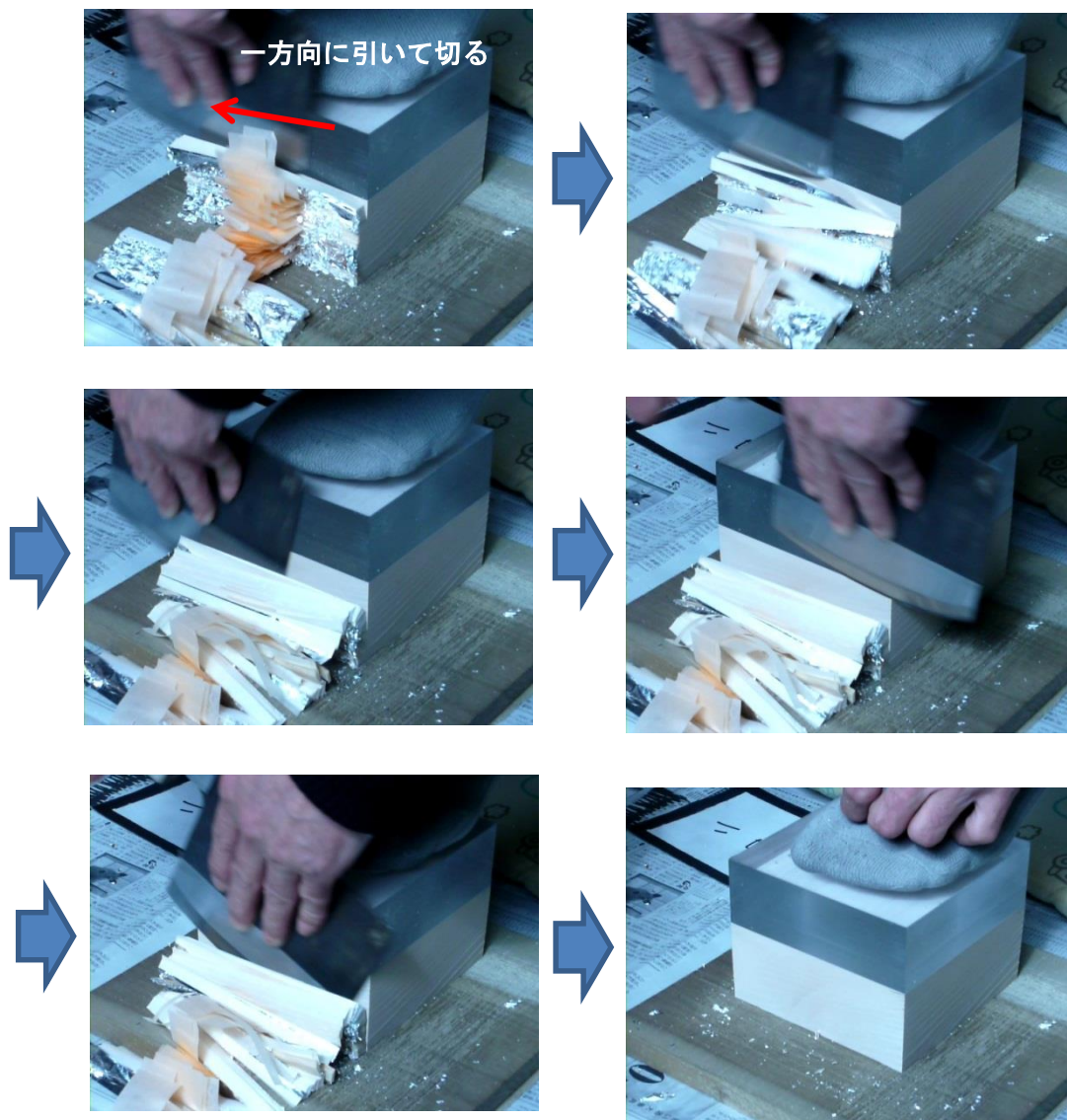


図 1.2 職人に裁断作業の流れ

第2章 積層体一面の自動切断装置の改良

2.1 積層体一面の切断装置

昨年度製作した積層体一面の自動切断装置を図 2.1 に再掲しておく。スライドガイドを用いて左右方向へ刃を移動できるようにし、さらに、リニアブッシュとシャフトにより上下方向にも移動できるようにしてある。また、刃の回転と直動が連動できるようにした。刃の移動部がスライドすると、歯車がラック上を回転し、同軸のタイミングプーリとタイミングベルトを介して下部の刃に回転が伝わるという機構になっている。この刃の回転運動と直線運動の比を回転一直動比と呼ぶ。2つのタイミングプーリの歯数を変えることで様々な回転一直動比が得られる。

なお、切断用の刃としては、京セラ（株）製超微粒子超硬丸ナイフ（刃厚:0.3mm 外径:100mm 刃角:20° 材質:FW35（粒径 $0.7\mu\text{m}$ ピッカース硬度 $1550\text{kg}/\text{mm}^2(\text{HV})$ 抗折強度 3250MPa 破壊靱性 $12\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ）を用いている。

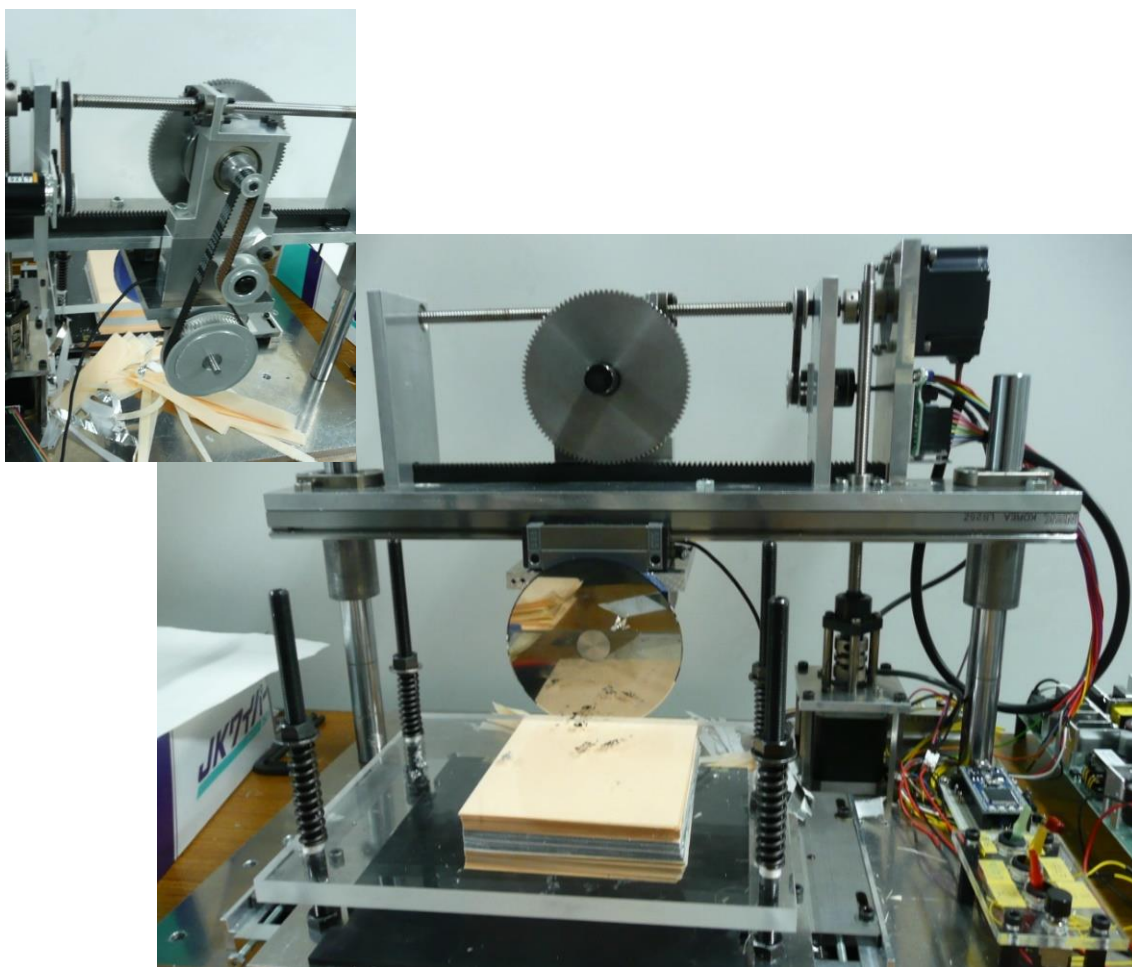


図 2.1 切断装置

- (1) 切り込み量を一定にするため左端から切断する
- (2) 右端までくれば一定量降下し、同じ切り込み量で全体を切る
- (3) 刃が積層体の下端にくれば上昇し、点Aに戻る

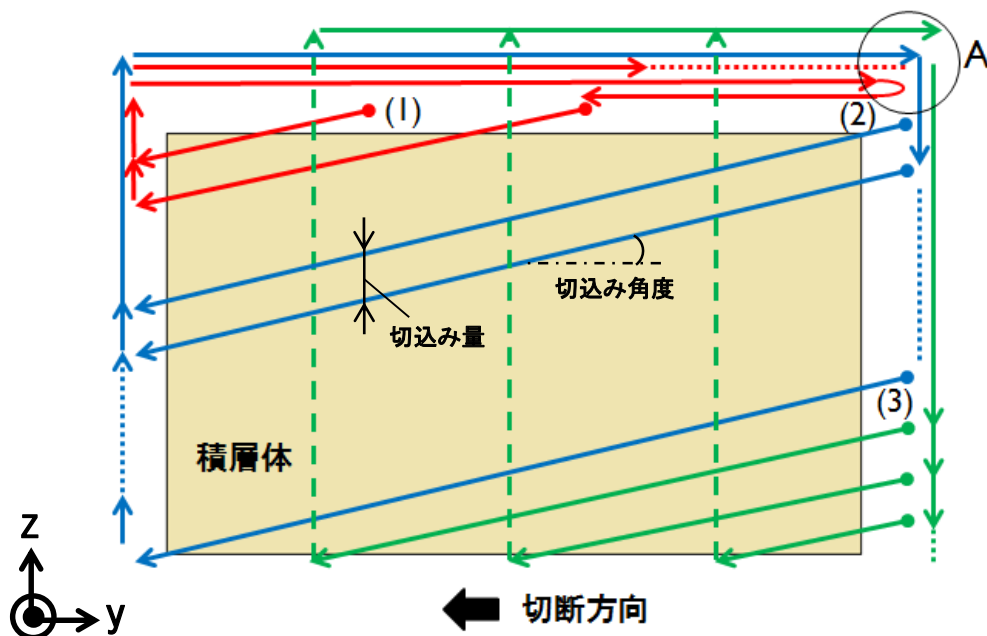
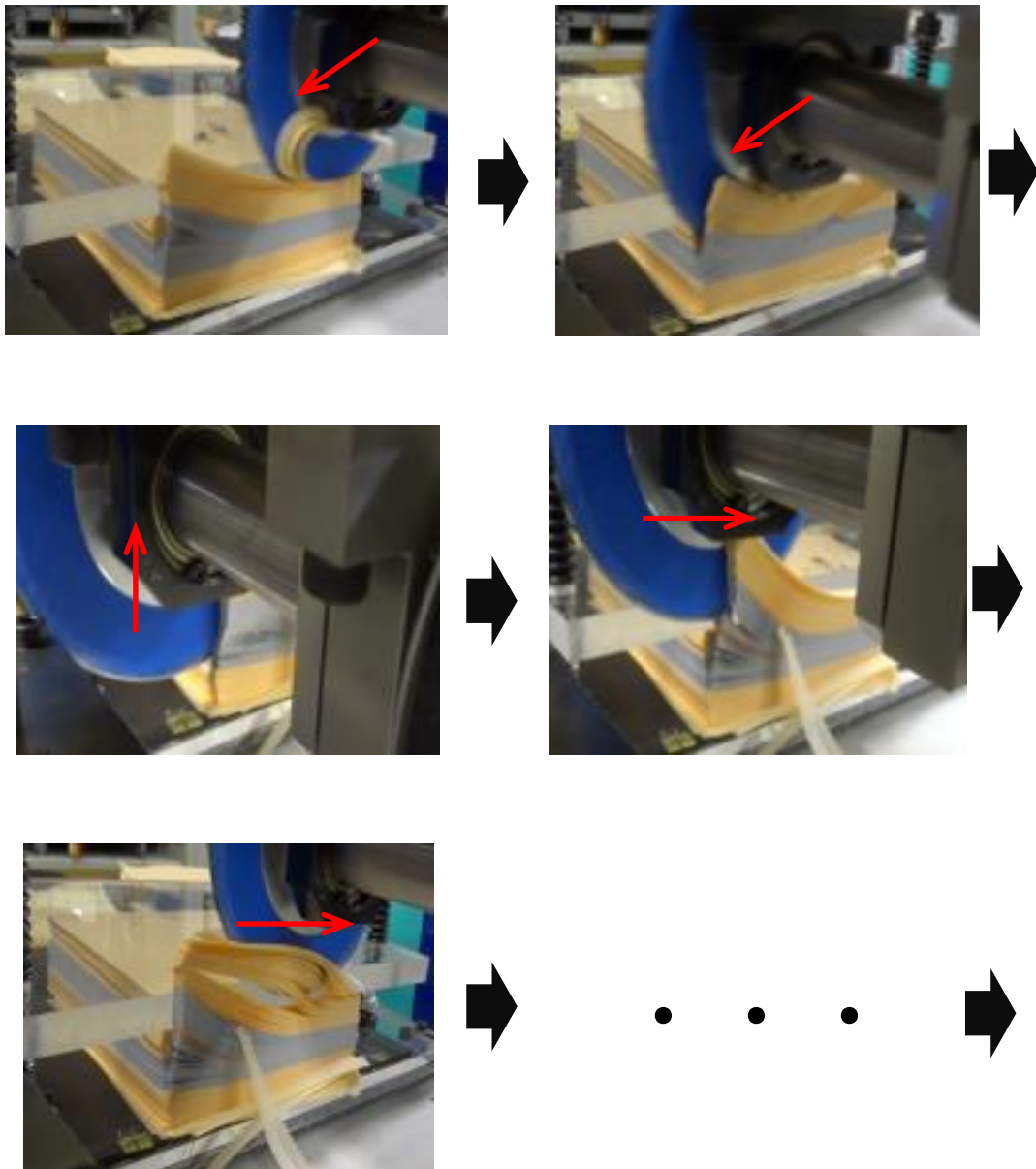


図 2.2 斜めから切り込む手順

上下左右のモータを連動させるような制御を行って、図 2.2 のように斜めに切断できるようにしてある。基準は左右方向のモータであり、そのモータの回転をロータリエンコーダで計測して、それに同期して、上下方向のステッピングモータの指令パルスが発生させている。1つのポイントは、刃を積層体の横から切り込ませることである（積層体の端の上から刃を押し付けるのではない）。また、積層体の一番上の層と一番下の層を切るときは、斜めではなく水平に刃を動かすようにしてある。なお、これらの制御はマイコンにプログラミングすることで実現している。

2.2 切断実験

アルミ箔の積層体を切断する様子を図 2.3 に示す。写真の右上から左下に切り込んでいく様子である。刃の回転一直動比は最小の設定（刃の直線移動に対してわずかに刃が回転する）で、切り込み量 3mm、水平の移動速度 80mm/s 程度である。積層体を固定するプレートの押し付け力は約 20kgf 程度である。



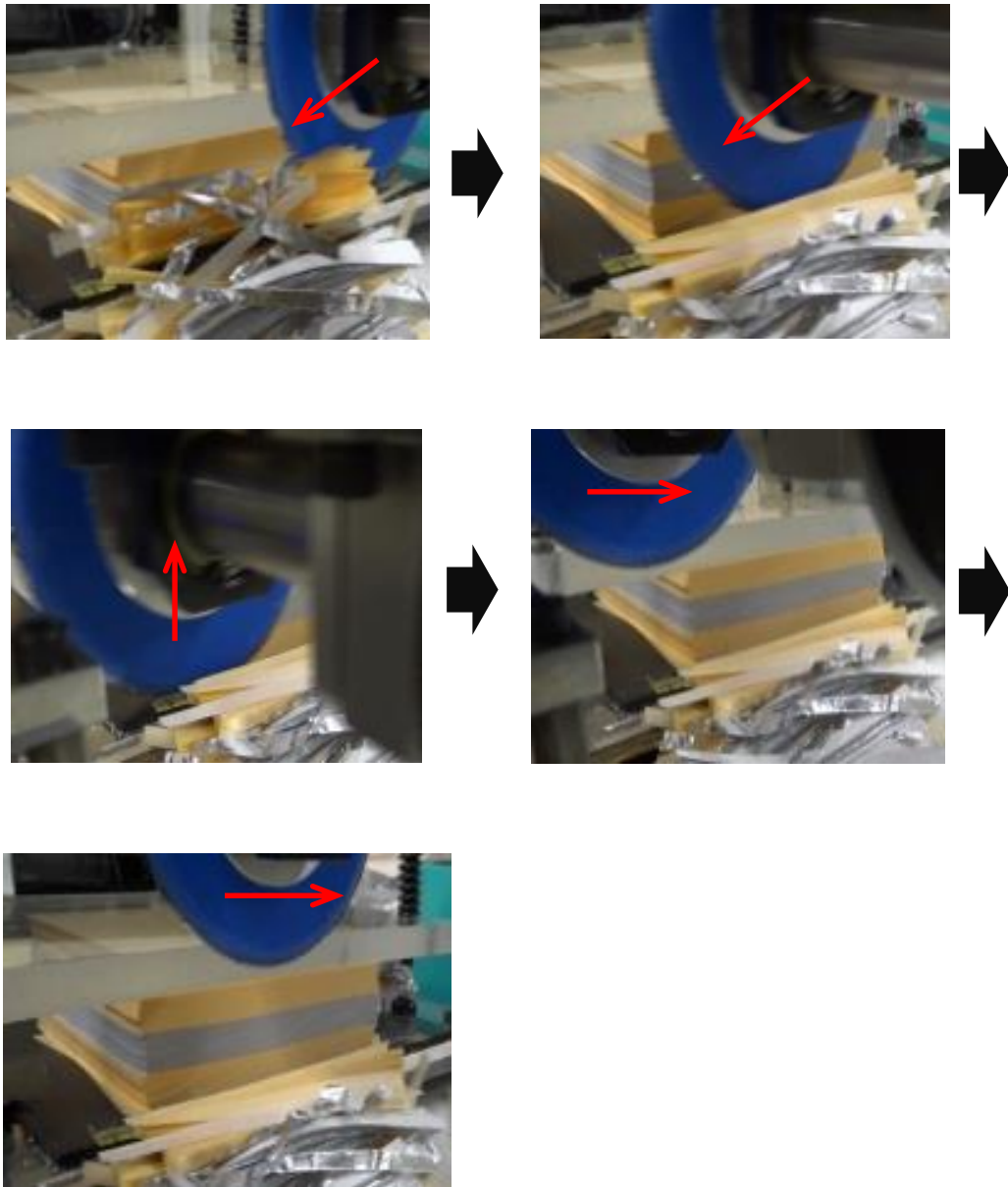


図 2.3 切断装置による切断の様子

2.3 職人の切断結果との比較

昨年度、手動の予備実験装置を用いて、ある程度良好な切断ができる条件をいくつか導いた。今年度は積層体一面の自動切断装置を用いてそれらの条件を改めて確認した。

その比較となる、職人が切断した積層体の断面の光学顕微鏡写真を図 2.4 に示す。観察すると、小さな破れや切断部に小さな凹凸が若干存在するが、大きな破れは存在せず、きれいに切れている。この切断状態を評価基準とし、各条件で自動切断した結果を比較していく。

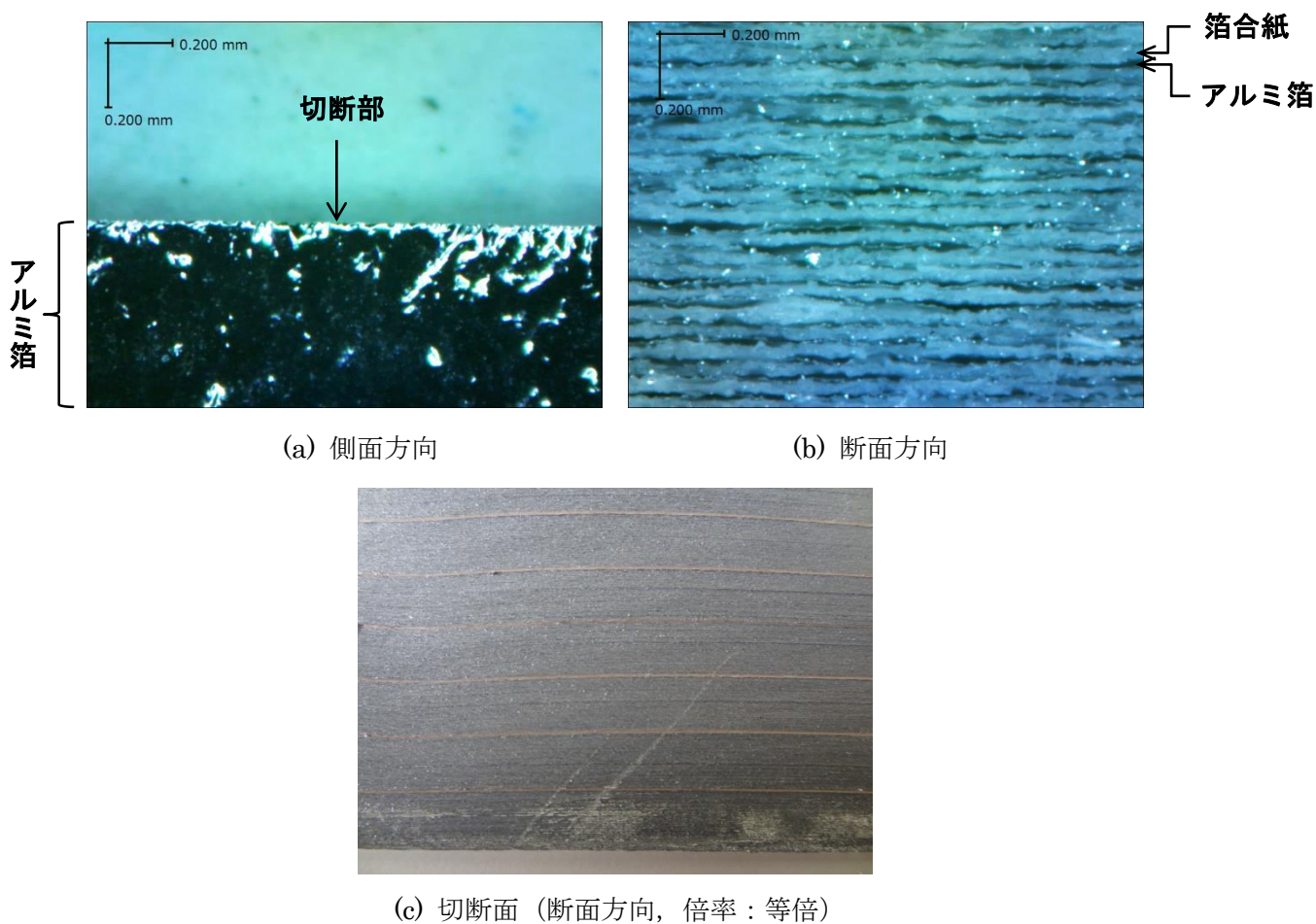
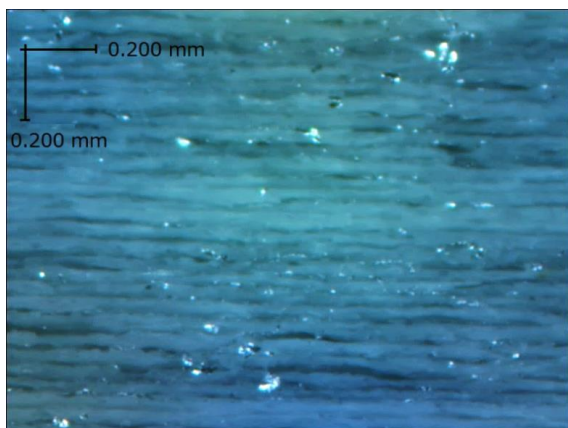


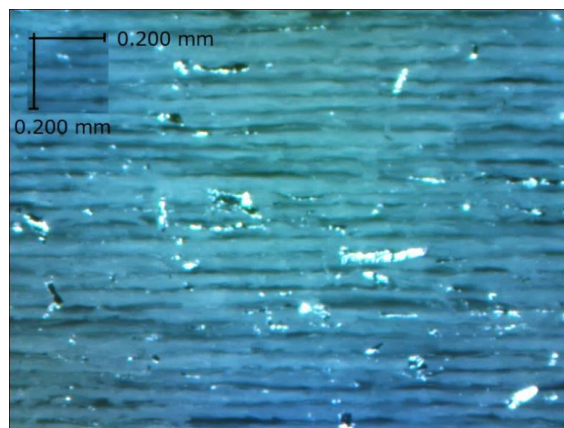
図 2.4 職人が切断したアルミ箔の切断部 (倍率: 210 倍)

2.4 回転一直動比の影響

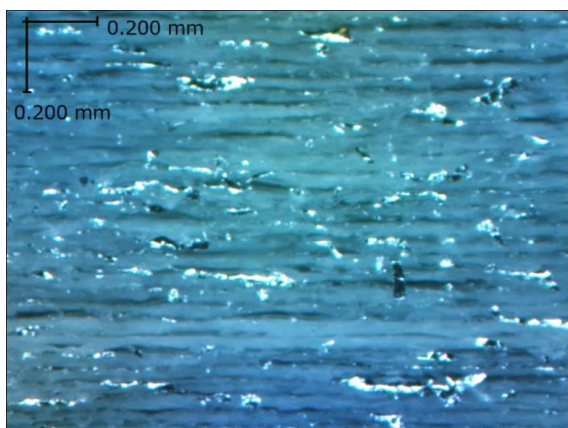
刃の回転一直動比が小さいとき (0.194, 0.350, 0.650, 1.00) で斜めに切断する実験の結果を図 2.5 に示す。条件は、切込み量 1mm、切込み角度を 5.7° 、送り速度 90mm/s とした。比較すると、回転一直動比が小さいほど破れが小さく少なくなっていくことがわかる。



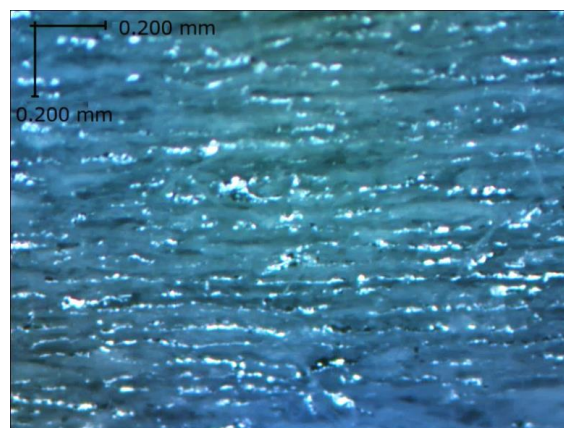
(a) 回転一直動比 : 0.194



(b) 回転一直動比 : 0.350



(c) 回転一直動比 : 0.650



(d) 回転一直動比 : 1.00

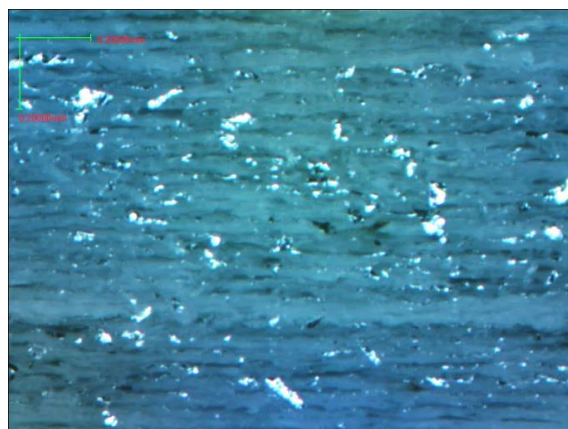
図 2.5 斜め切断時の回転一直動比の比較 (断面方向)

大きい回転一直動比を含めた 0.194, 0.556, 1.54, 2.86, 5.14 で水平に切断する実験の結果を図 2.6 に示す。条件は、切込み量 1mm、切送り速度 90mm/s である。回転一直動比が最小 (0.194) のときと最大 (5.14) のときでは、破れが小さく少なくなっており、回転一直動比を 1.00 に近づけるほど破れが大きくなる多くなっていることがわかる。最小のときと最大のときの差異はあまりない。これは回転一直動比を 1 に近づけるほど積層体を“押し切る”形になるため切断状態が悪くなり、逆に回転一直動比を小さくあるいは大きくするほど積層体を“引いて切る”形になり、良好に切断できるのではないかと推察される。

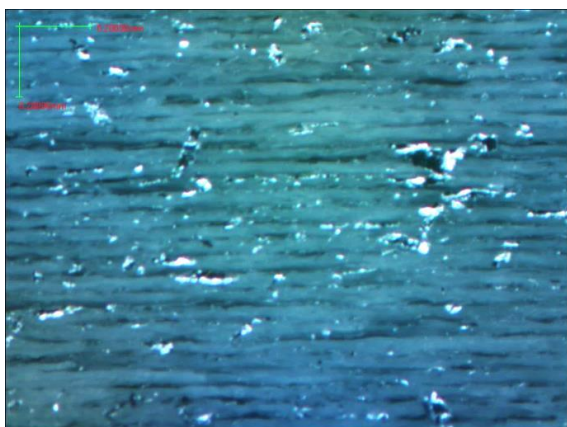
以上の結果から、回転－直動比が最小のときと最大のときが適当であるが、最小の方が機構上、設計しやすいためそちらを選択する。また、回転－直動比 0.194 の斜めと水平に切り込む実験結果を比較すると、斜めに切断する方が良好に切断できている。



(a) 回転－直動比 : 0.194



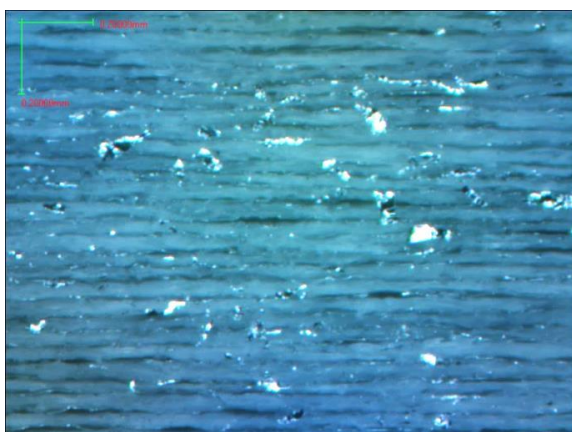
(b) 回転－直動比 : 0.556



(c) 回転－直動比 : 1.54



(d) 回転－直動比 : 2.86

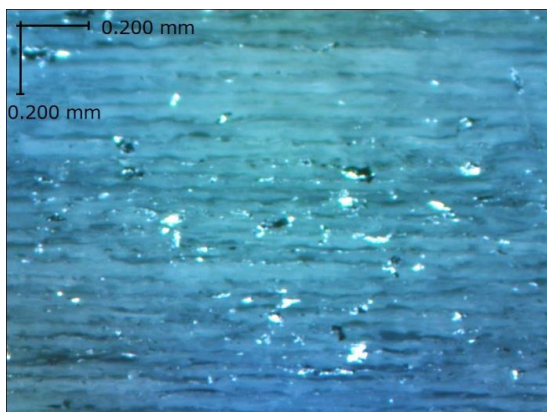


(e) 回転－直動比 : 5.14

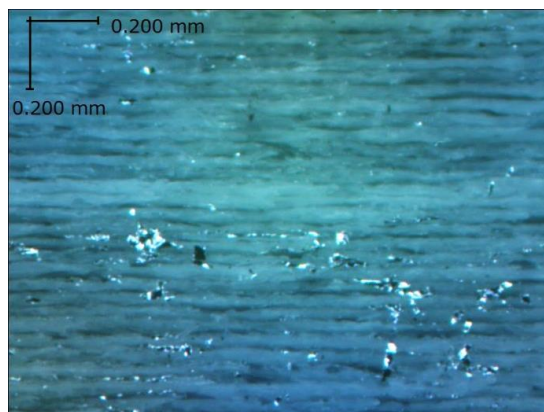
図 2.6 水平切断時の回転－直動比の比較 (断面方向)

2.5 切込み角度の影響

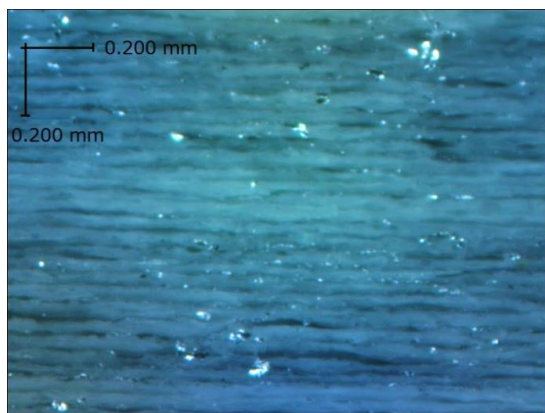
次に、切込み角度（ 1.0° ， 3.3° ， 5.7° ， 7.6° ， 11° ）を変化させて行った実験結果を図 2.7 に示す。条件は、回転一直動比 0.194，切込み量 1mm，送り速度 90mm/s である。 3.3° ， 5.7° ， 7.6° では破れも小さく少なく、きれいに切れているが、 1° ， 11° では破れが大きく多くなっていることがわかる。これは切込み角度を小さくすると、切断する際に箔を引っ張り出してしまうことで破れが生じてしまい、切込み角度を大きくすると、一枚の箔に対して切り込む回数が増えるため破れが多くなってしまうと考えられる。よって、切込み角度の条件としては、 5° 付近を選ぶ。



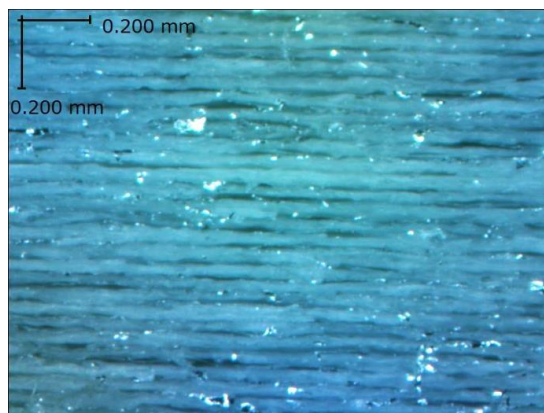
(a) 切込み角度： 1.0°



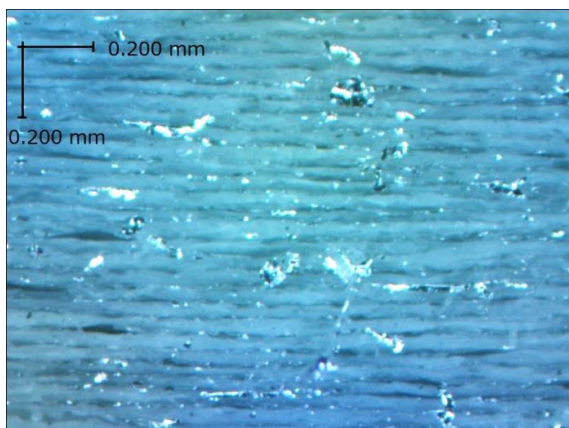
(b) 切込み角度： 3.3°



(c) 切込み角度： 5.7°



(d) 切込み角度： 7.6°

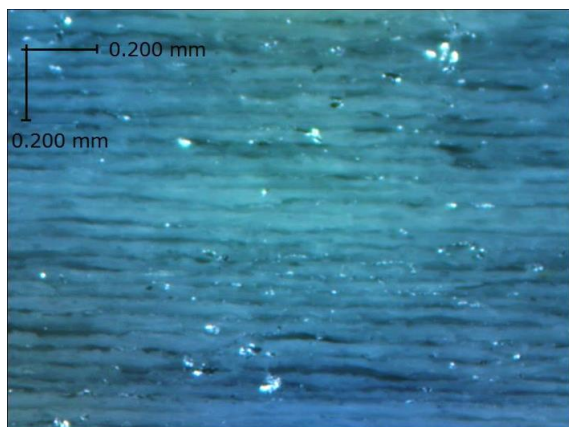


(e) 切込み角度： 11°

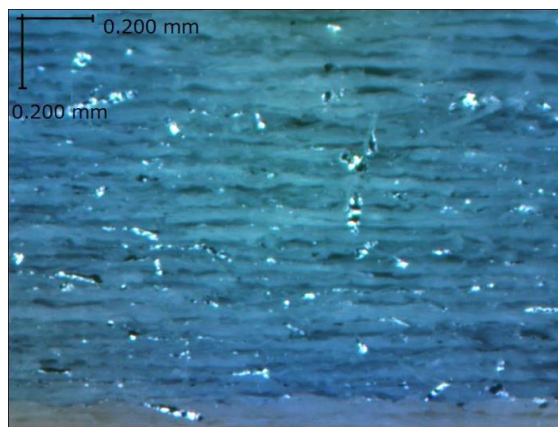
図 2.7 切込み角度の比較

2.6 切込み量の影響

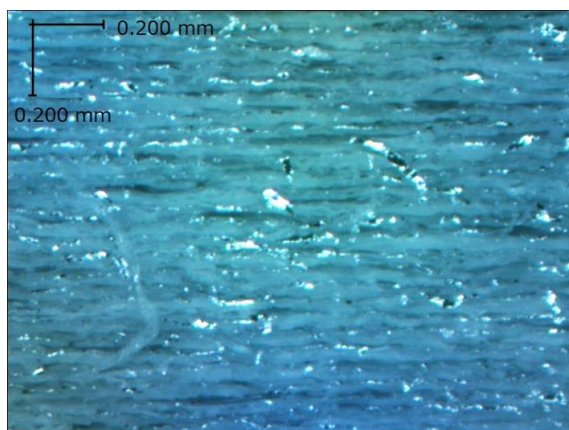
切込み量（1mm, 3mm, 5mm）を変化させて行った実験結果を図 2.8 に示す。条件は、回転一直動比 0.194、切込み角度 5.7° 、送り速度 90mm/s である。切込み量を大きくするほど破れが大きくなっていることがわかる。断面の良好さからは切込み量が小さい方がよいが、作業効率とのバランスを考える必要がある。



(a) 切込み量 : 1mm



(b) 切込み量 : 3mm

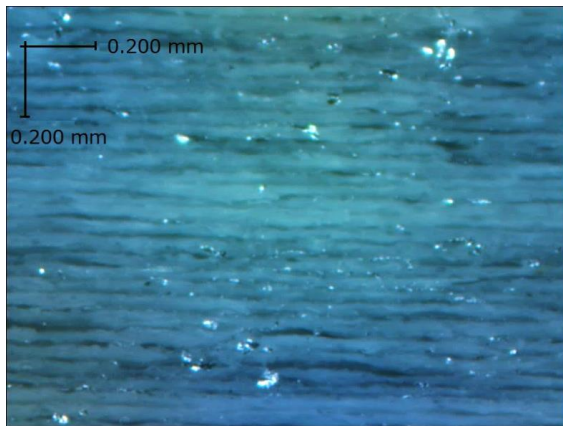


(c) 切込み量 : 5mm

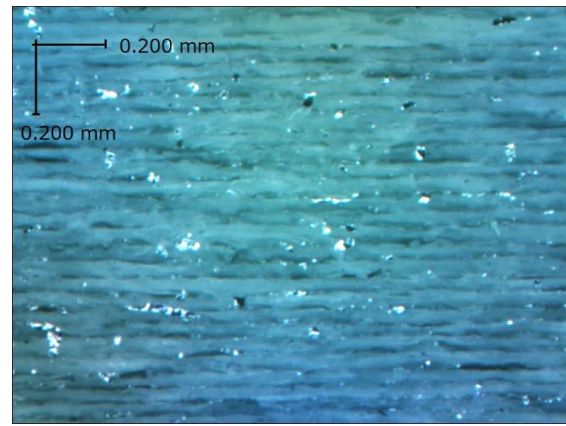
図 2.8 切込み量の比較

2.7 刃の送り速度の影響

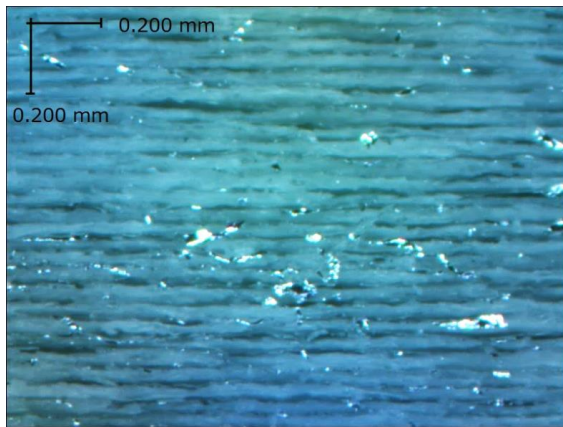
刃の移動部の送り速度（90mm/s, 70mm/s, 50mm/s, 30mm/s）を変化させて行った実験結果を図 2.9 に示す。条件は、回転一直動比 0.194、切込み角度 5.7° 、切込み量 1mm である。これまでの実験ほどの差がでなかったが、この実験の範囲では比較的送り速度を速くする方が破れは小さく少なくなっている。



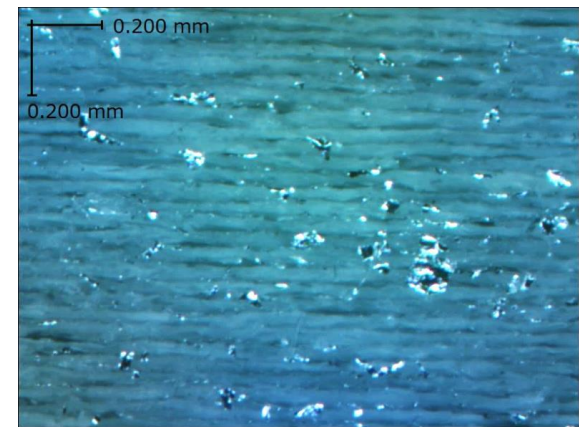
(a) 送り速度 : 90mm/s



(b) 送り速度 : 70mm/s



(c) 送り速度 : 50mm/s

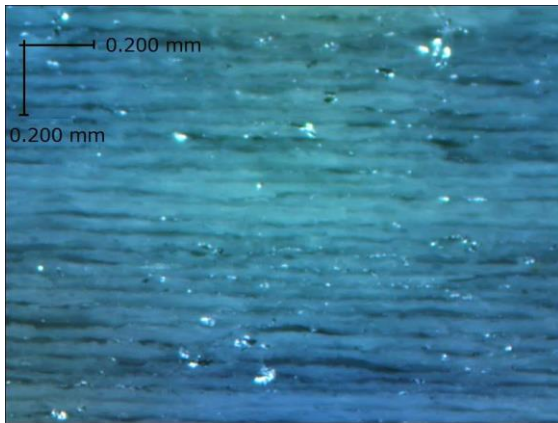


(d) 送り速度 : 30mm/s

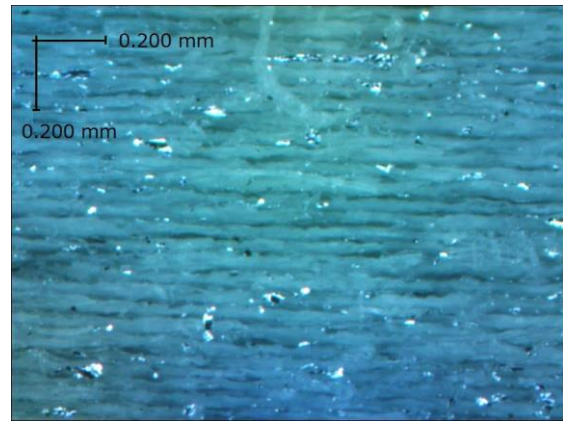
図 2.9 送り速度の比較

2.8 片刃と固定プレートの間隔

ここまでの実験では、すべて、刃と箔固定プレートの間隙が極力小さくなるよう調整し、固定プレートの際を切るようにした。この間隙の影響を確認するため、刃と箔固定プレートの間隔をわざと空けて (3mm) 実験した。結果を図 2.10 に示す。間隔を大きくするとやはり破れが大きく多くなっており、間隙は空けずに固定プレートの際を切る方が良いことが確認できた。



(a) 間隔 : 0mm

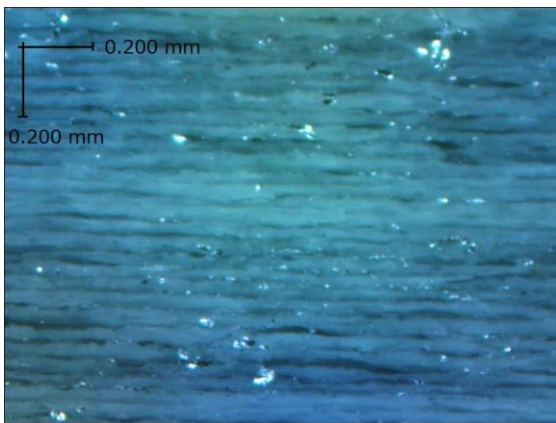


(b) 間隔 : 3mm

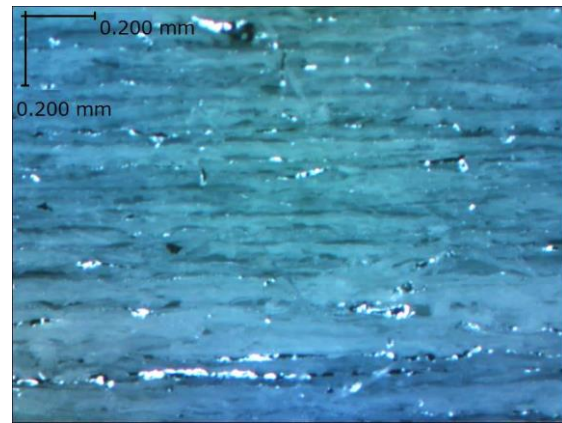
図 2.10 刃と箔固定プレートとの間隔の比較

2.9 片刃と両刃の比較

ここまでの実験では、すべて、刃は両刃を用いていたが、職人が使用している薄刃が片刃であることと、片刃の方がより固定プレートの際を切ることができることから、刃を片刃に変更して切断状態の検証を行った。結果を図 2.11 に示す。両刃より片刃の方が破れは大きく多くなっている。片刃は刃先が常に積層体と接しているため、刃の移動により既に切断されている面に刃先が擦れて切断面を悪化させるものと思われる。また、片刃は両刃より鋭さが劣ることも原因の一つであると考えられる。逆に、現在用いている両刃は薄く鋭角の刃であり、厚い両刃ほど悪影響がないとも言える。



(a) 両刃



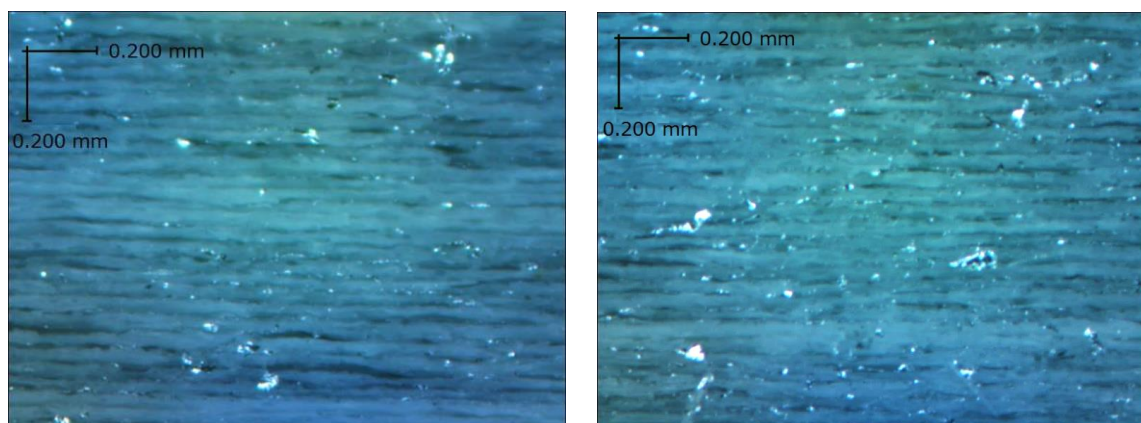
(b) 片刃

図 2.11 片刃と両刃の比較

2.10 刃径のコンパクト化

ここまでの実験ではすべて、刃径 100mm の刃を用いてきたが、設計のしやすさや経済性を考えるともっと小さい径の方がよい。そこで、刃径を 50mm に変更して実験を行っ

た。結果を図 2.12 に示す。回転一直動比は刃径を変更するため値が変わるが、刃径 100mm での 0.194 に近い 0.175 で実験を行った。刃径 50mm にすると、わずかに破れが多くなっているが、許容できる程度である。



(a) 刃径：100mm，回転一直動比：0.194 (b) 刃径：50mm，回転一直動比：0.175

図 2.12 刃径の比較

2.11 選択した切断条件

以上の実験結果に、作業効率や経済性を加味して、実用的な自動切断装置を製作する上での適当な切断条件を以下にまとめた。

- ①回転一直動比，切込み量，刃と箱固定プレートの間隔が小さい
- ②切込み角度は 5° 付近
- ③刃の形状は両刃
- ④刃の送り速度が速い
- ⑤刃径が小さい

上記の条件を満たす切断結果は、図 2.12 であるが（回転一直動比 0.175，切込み角度 5.7° ，切込み量 1mm，送り速度 90mm/s）、職人が切断した箱（図 2.4）と比較しても、同等もしくはそれ以上に良好に切断できている。

第3章 積層体四面の自動切断装置の設計と試作

3.1 機構の概要

積層体一面の切断装置での実験結果を基に、実用化に向けた積層体四面の自動切断装置を製作した。全体構造を図 3.1 に示す。主に、切断機構と箔固定機構の2つから成っており、刃の上下左右移動、積層体の固定、固定台の移動、ターンテーブルの回転がすべて自動制御できるようになっている。各機構の位置決めはすべてマイクロフォトセンサを用いて行っている。各モータの主な仕様を表 3.1 に示す。先の実験結果から、刃と箔固定ブロックの間には隙間ができないようにすることが望ましいが、その調整を自動で行うのは難しく、新たに調整機構を設けると装置が大きくなってしまう。そこで、より簡単な機構で刃が固定ブロックの際を切ることができるようにするため、固定ブロックを刃に押し付けながら切断するという方法を考案した。切断後の箔の寸法精度は±1mm程度であり、予備実験においてこの方法の有用性を確認している。なお、積層体の4面の切断は、積層体をターンテーブル上で固定ブロックで押し付けたまま、90度ずつ回転したのち切断することで実現した。

表 3.1 各モータの規格

	種類	型番	定格回転速度/ 基本ステップ角	定格出力/ 最大静止トルク
モータ①	ブラシレスモータ	BLHM450K-A	2500rpm	50W
モータ②	ステッピングモータ	PKP546N18A	0.72°	0.44N・m
モータ③	ステッピングモータ	PK523A-M10	0.072°	0.21N・m
モータ④	ステッピングモータ	PK546PA	0.72°	0.44N・m
モータ⑤	DC モータ	RS 440-329	135rpm	0.20N・m

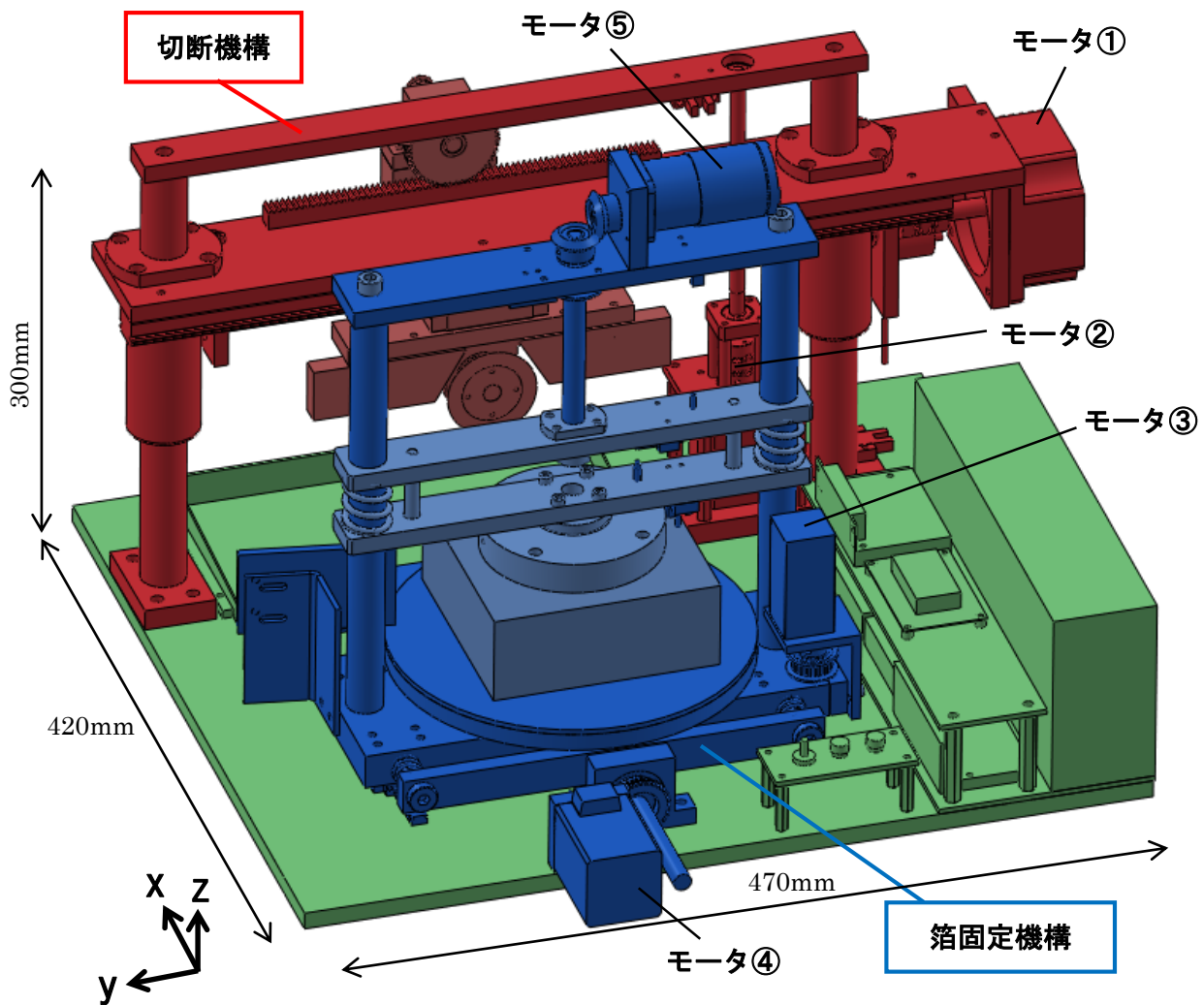


図 3.1 自動切断機の全体構造

3.2 切断機構

切断機構を図 3.2～図 3.4 に示す。基本構造は積層体一面の切断実験装置とあまり変わらないが、モータの位置を変えるなどしてよりコンパクトにまとめた。切断部の剛性を高めるため、両サイドのシャフトをさらに太くし、上端で固定した。送り速度をさらに速くするため、ブラシレスモータ（モータ①）を高出力のものに変更した。刃の刃径は 50mm とし、回転一直動比が 0.194 になるように歯車・タイミングプーリの歯数を調整している。切断の際、箔固定ブロックを刃に押し付けながら切断するため、刃の両サイドにはガイド（プレート）を設けている。さらに、刃の周全体を利用できるようにして、刃の一部のみが磨耗するのを防ぐため、歯車部にワンウェイクラッチを埋め込んだ。切断時（負荷時）にはトルクを伝え、無負荷時には空転するようにした。刃の上下方向の位置決めはセ

ンサ①, ③を用いて行い、左右方向に関しては、移動部に設置したセンサ②を用いて行う。

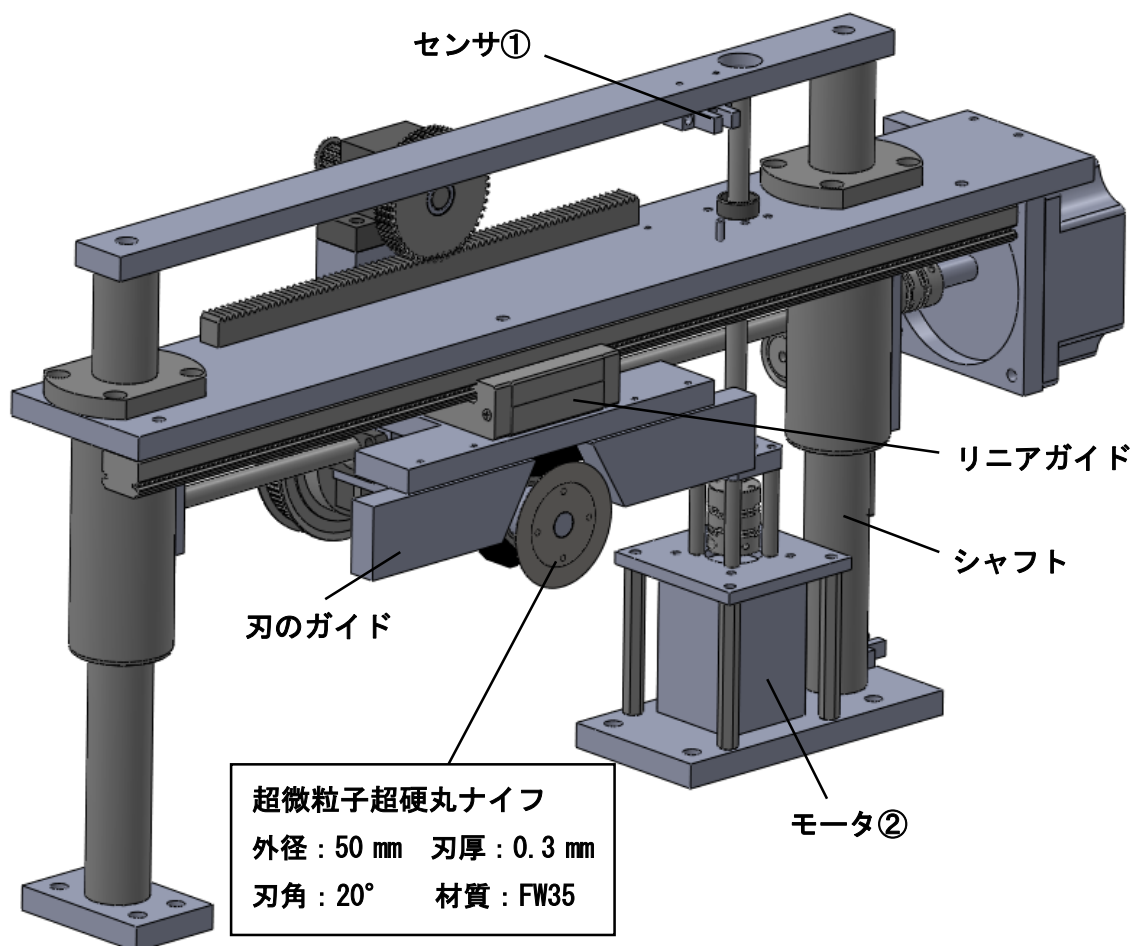


図 3.2 切断機構 (正面)

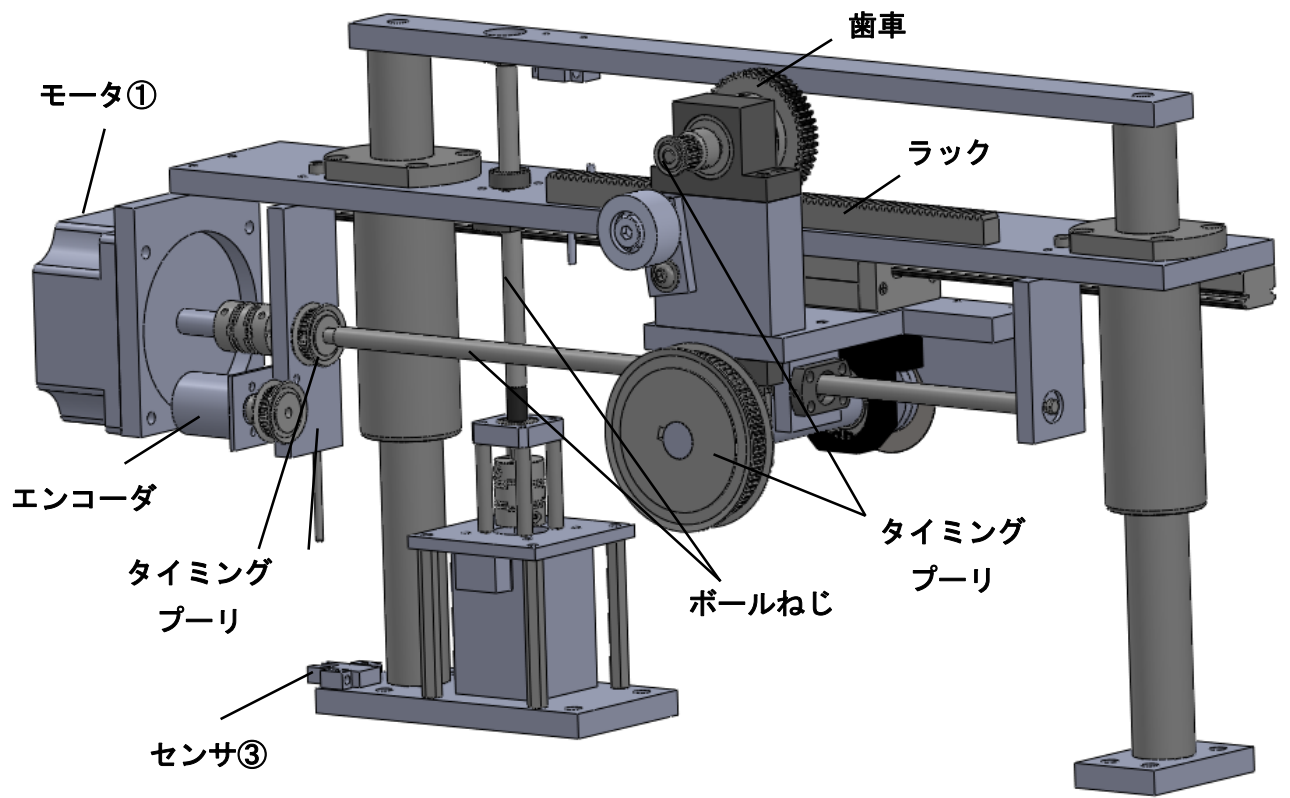


図 3.3 切断機構（背面）

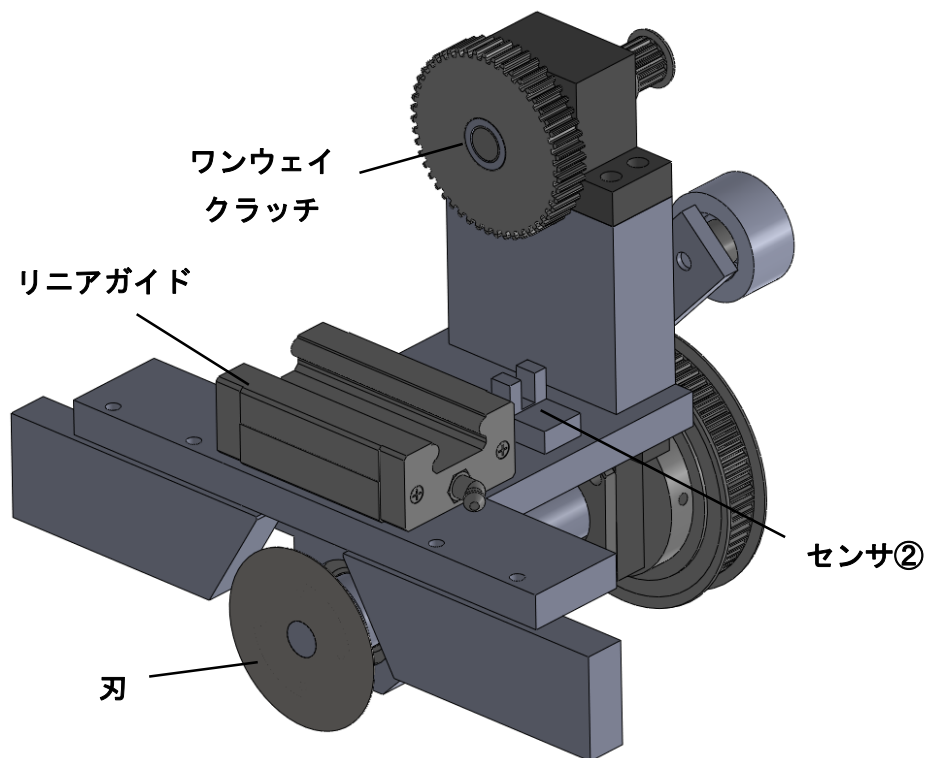


図 3.4 切断機構（移動部）

左右方向の刃の送り速度は、モータ①の回転速度を 3000rpm とすると 100mm/s となる。また、上下方向の送り速度は、モータ②の回転速度を 1000rpm とすると 33.3mm/s である。

3.3 箔固定機構

箔固定機構を図 3.5、図 3.6 に示す。この機構には積層体の押し付け、ターンテーブルの回転、箔固定台の移動という 3 つの機能がある。

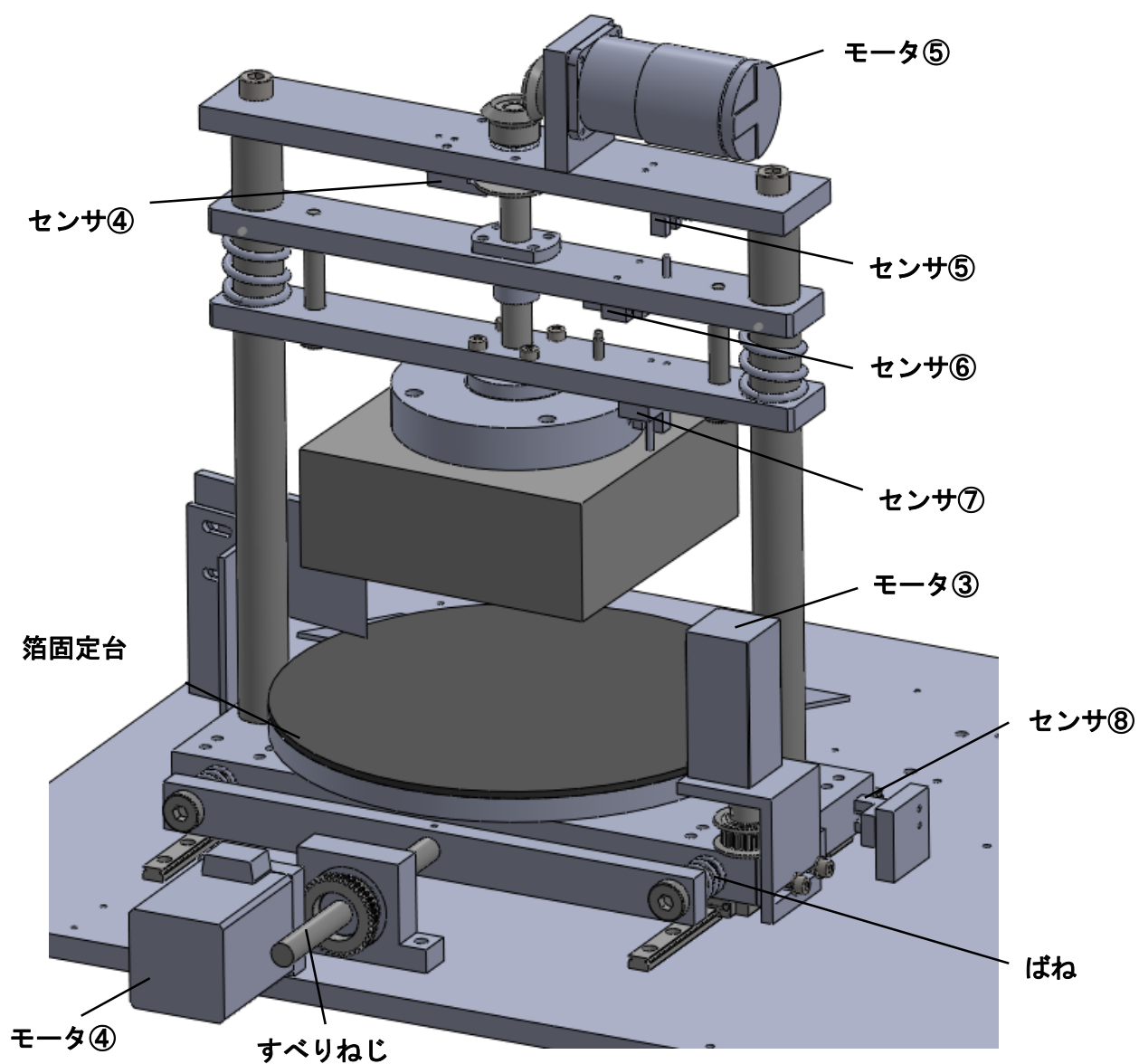


図 3.5 箔固定機構（正面）

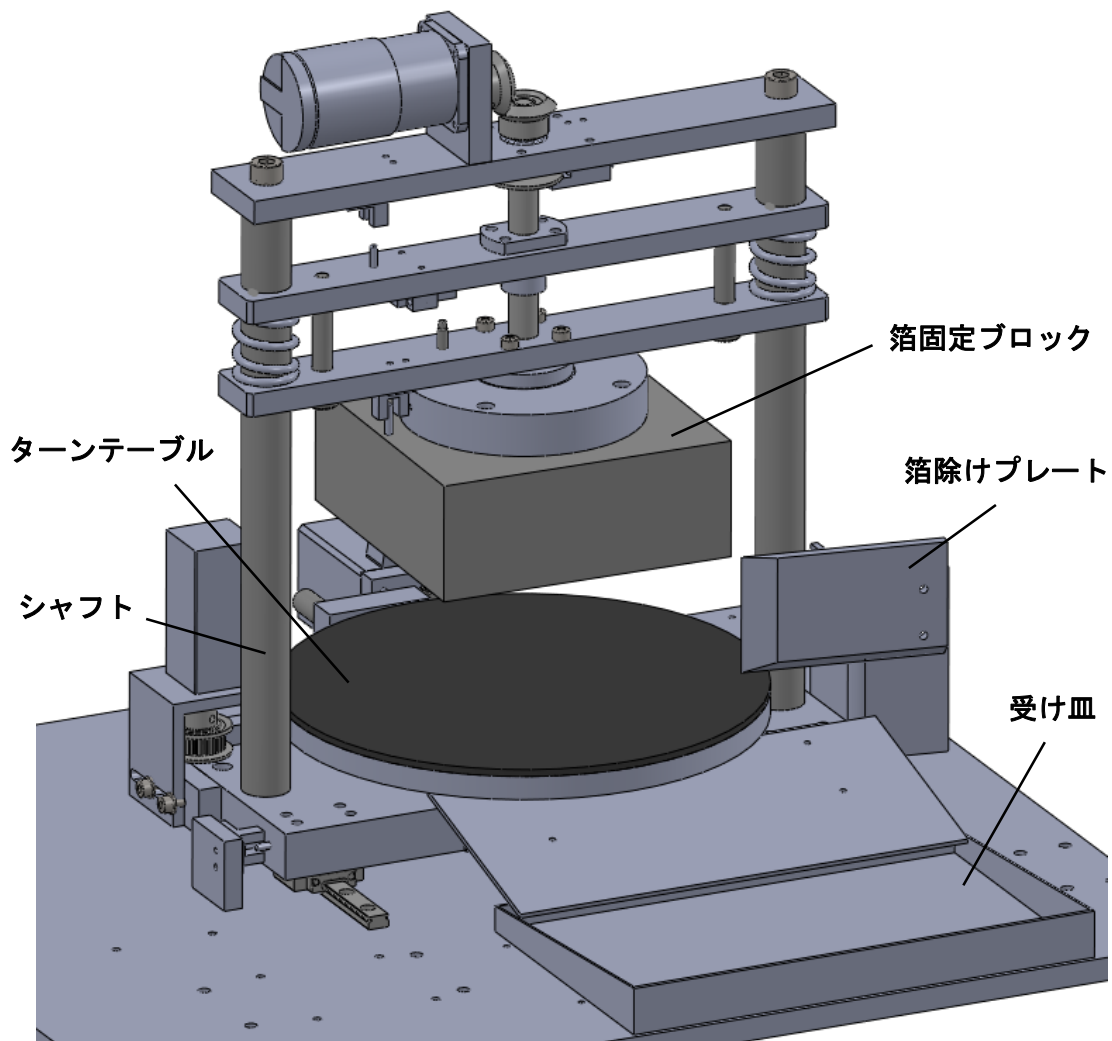


図 3.6 箔固定機構 (背面)

まず、積層体の押し付けは、モータ⑤を用いてすべりねじを回転させ、図 3.7 の上下移動部を降下させることで行う。上下移動部プレート①をナット、プレート②を箔固定ブロックと固定し、プレート①の間にばねを挟み、下からボルトで 2 枚のプレートを連結した。こうすることで、押し付ける時はプレート①だけが降下し荷重をかけることができ、上昇させる時は上下移動部全体が上昇するようになっている。押し付け力は、センサ⑥を用いてプレート間の距離（ばねの縮み）を検出することで調整可能にした。ばね定数は 29.4N/mm であり、押し付け力を 400N に指定すると、ばねの縮みは 6.80mm となる。また、センサ⑤で箔押し付けの上端初期位置、センサ④ですべりねじの回転数、すなわち上下移動部の初期位置からの降下距離を検出できるので、センサ④、⑤、⑥で箔固定ブロックの上下位置を検出することができることになる。この位置情報は、切断機構とリンクす

る上で重要なポイントとなる。なお、箔押し付けの速度は、モータ⑤の回転速度を 135rpm とすると 4.5mm/s である。

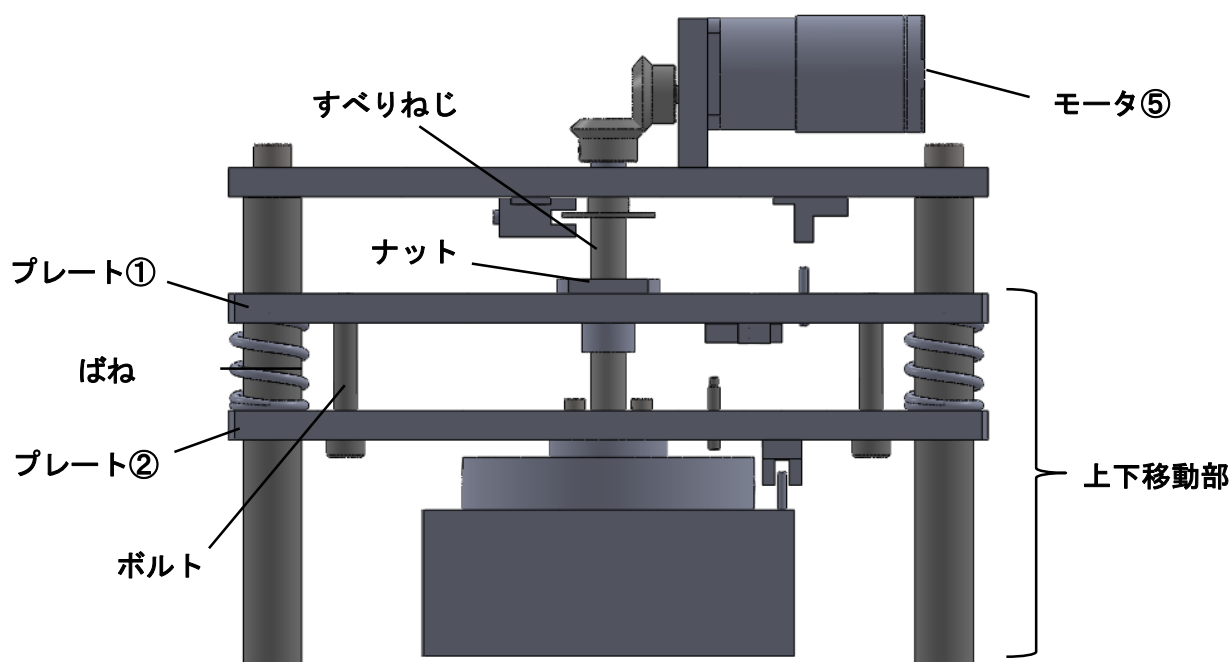


図 3.7 箔押し付けの機構

ターンテーブルの回転は、図 3.8 に示すように、下部にベアリングとタイミングプーリを取付け、同じくタイミングプーリを取付けたモータ③を用いて行う。積層体の切断は積層体の 4 面をずらさず均等に行う必要があるため、ターンテーブルに乗せた積層体を箔固定ブロックで固定したまま 90° ずつ回転させ、4 面を切断できるようにした。回転の位置決めはセンサ⑦を用いる。ターンテーブルの回転速度はモータ③の回転速度を 100rpm とすると 23.3rpm である。

箔固定台の移動については、図 3.9 に示すように、箔固定台をリニアガイドに載せ、モータ④を用いてナットを回転させることで、すべりねじ、プレート、ばねを介して箔固定台を移動できるようにした。ばね部の機構は箔押し付け機構と同じようになっている。箔固定ブロックを刃に押し付ける時はプレートが押し込まれて荷重をかけることができ、刃から離す時は箔固定台全体が移動するようになっている。箔固定台の位置決めはセンサ⑧を用い、モータ④の回転量を調整することで箔固定ブロックの刃への押し付け力を調整することができる。ばね定数は 9.8N/mm であり、押し付け力を 100N とするとばねの縮みは 5.1mm となる。箔固定台の移動速度は、モータ④の回転速度を 500rpm とすると 16.7mm/s である。

箔固定台の左端にはプレートを設け、ターンテーブルを反時計回りに回転させることで、積層体の切りくずが下の受け皿に除けるように配置している。

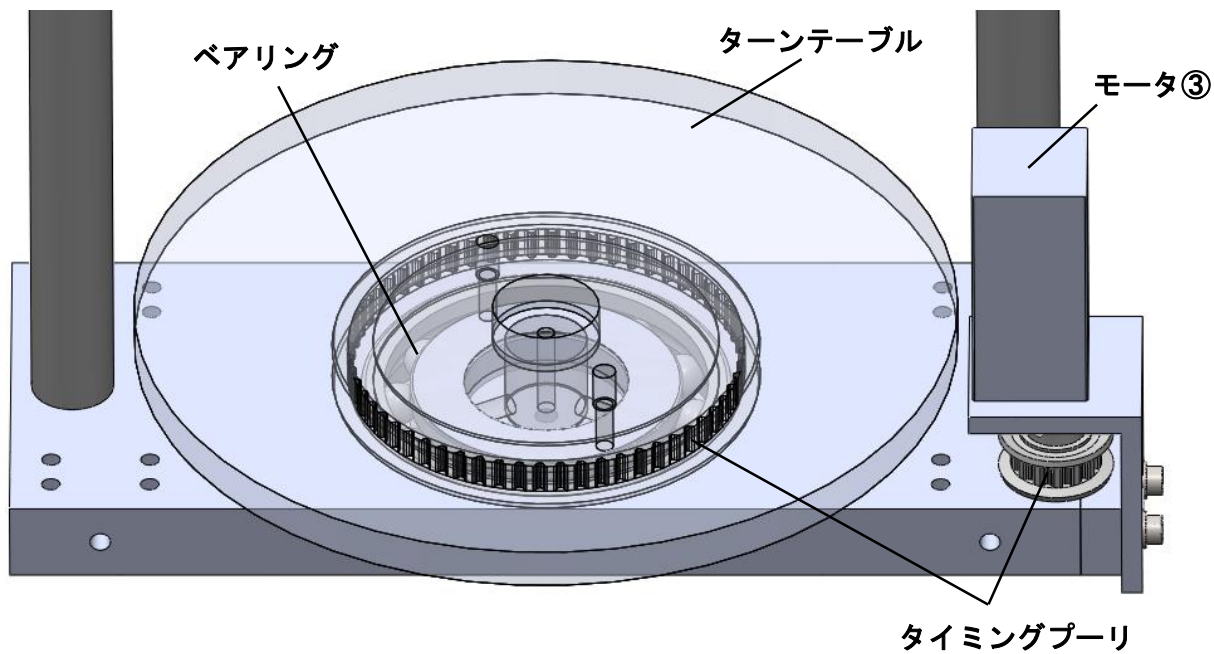


図 3.8 ターンテーブル部の構造

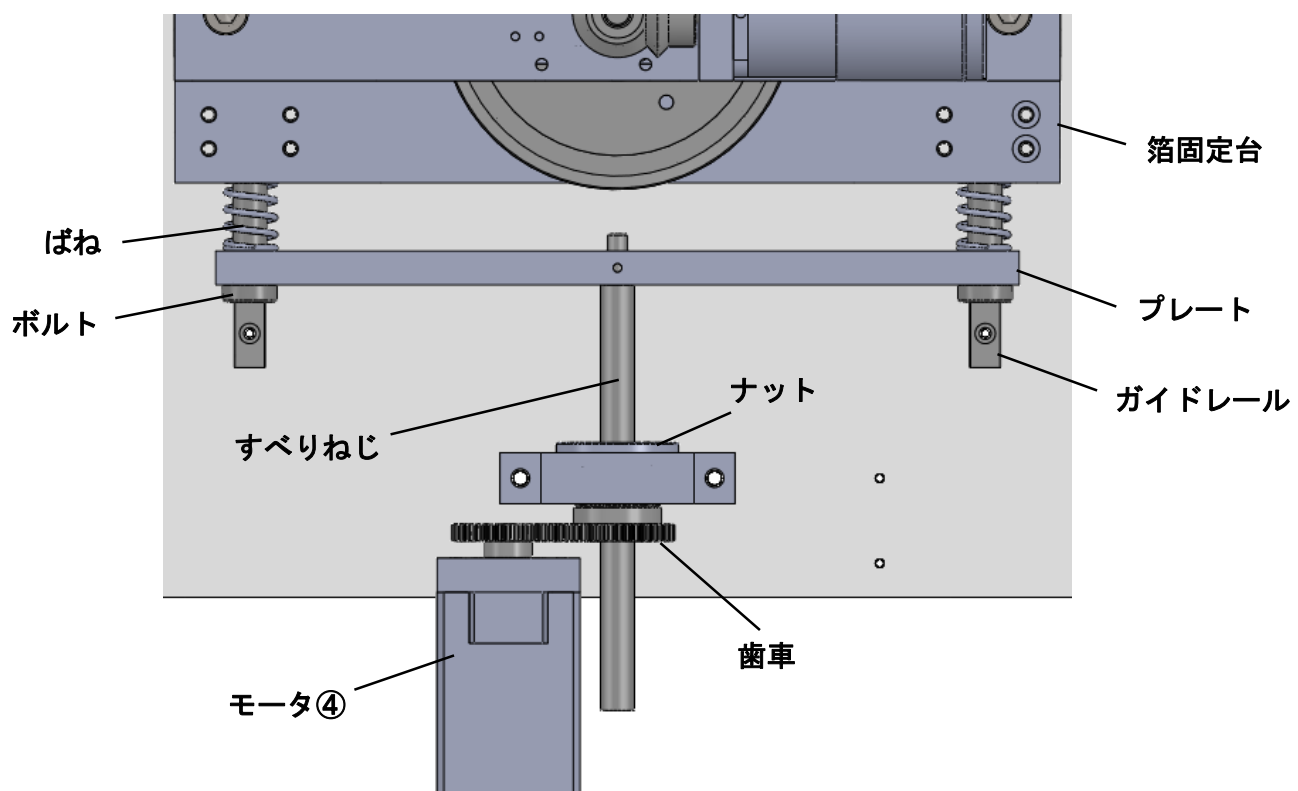


図 3.9 箱固定台移動の構造

3.4 切断制御

自動切断装置の制御は NXP セミコンダクターズ社製のマイコン (LPC1768) を使用して行った。自動運転のフローチャートを図 3.10、各動作を図 3.11 に示す。ユーザーが行う作業は積層体のセットと取り出しのみで、スイッチ一つで積層体の 4 面を自動で切断する流れとなっている。

切断工程は積層体一面の切断装置と同様の方法で行う。ただし、切断方向は以前のものと反対方向になる。フローチャート中の基準点とは、 y 方向には箔固定ブロックの中央、 z 方向には箔固定ブロックの下端にある位置のことを示す。これは箔固定ブロックを刃に押し付ける際に重要であり、 z 方向の位置は箔固定ブロックで積層体を固定する際に用いるセンサ (センサ④, ⑤, ⑥) を利用して検出する。座標は図 3.1 に従う。

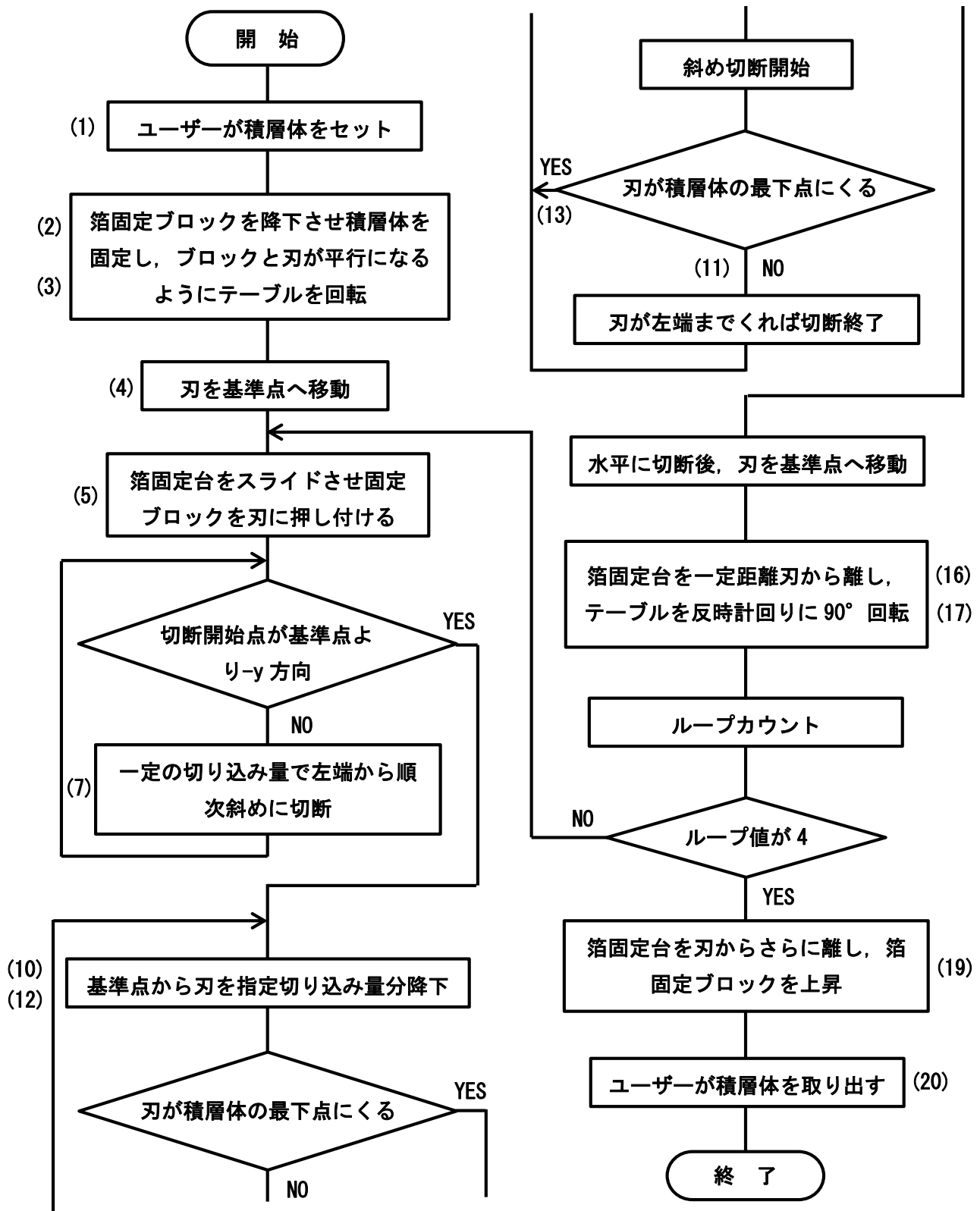
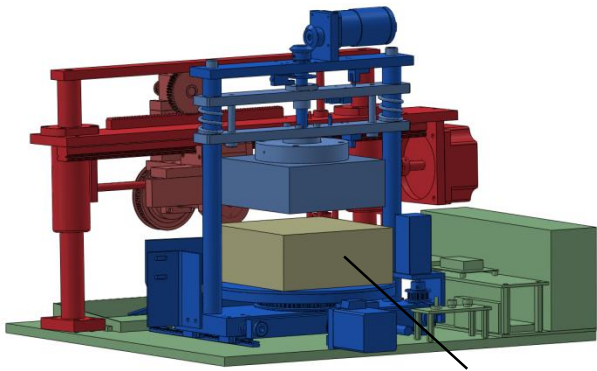
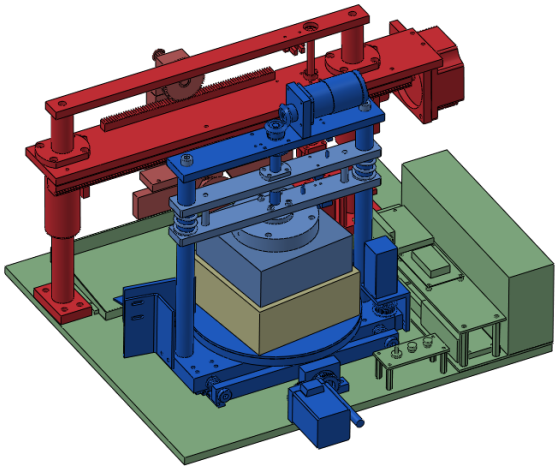


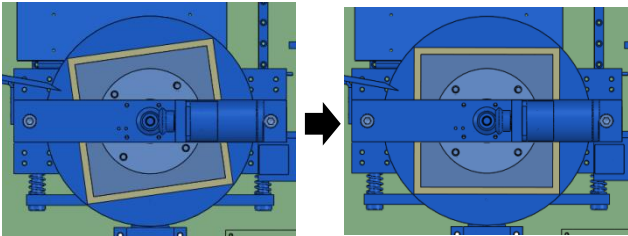
図 3.10 自動運転のフローチャート



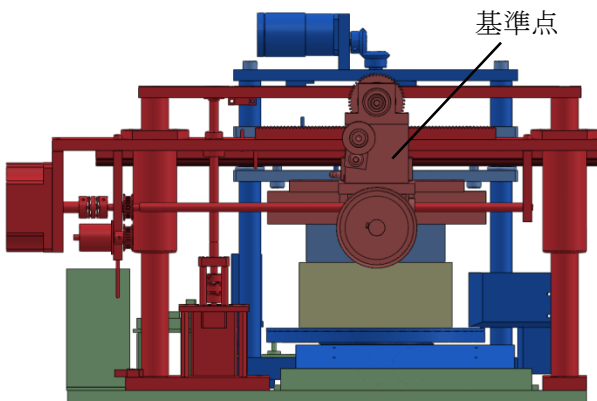
(1) 積層体をセット 積層体



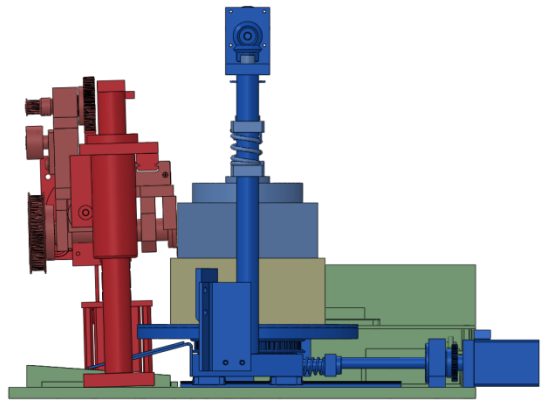
(2) 箱固定ブロックの押し付け



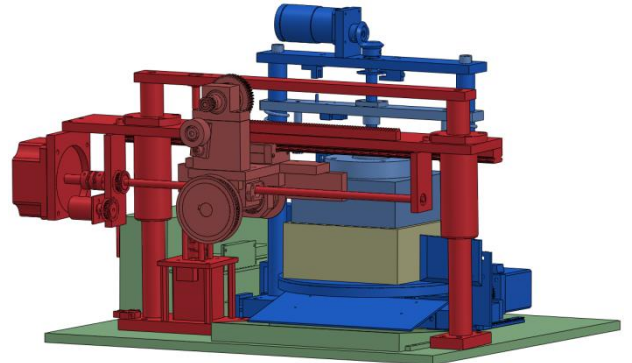
(3) ターンテーブルの回転



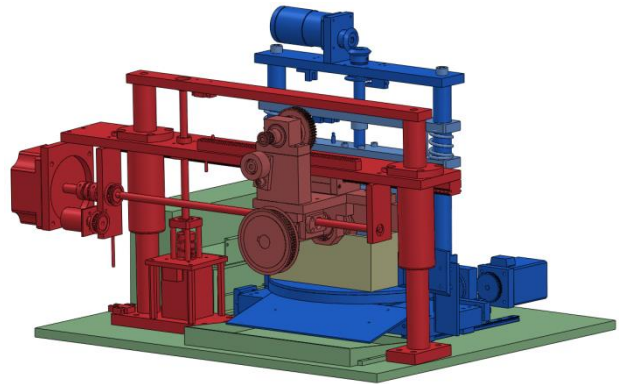
(4) 刃を基準点へ移動



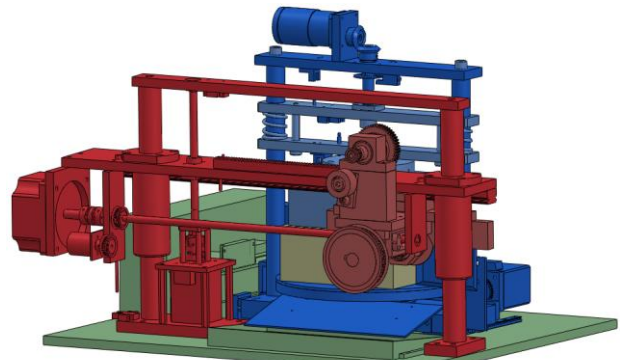
(5) 箱固定台の押し付け



(6) 切断開始

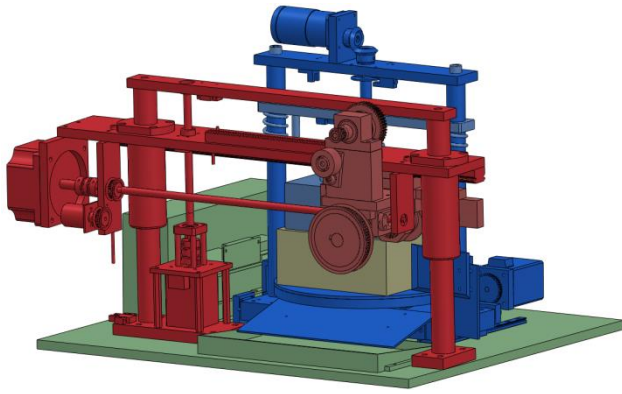


(7) 斜め切断

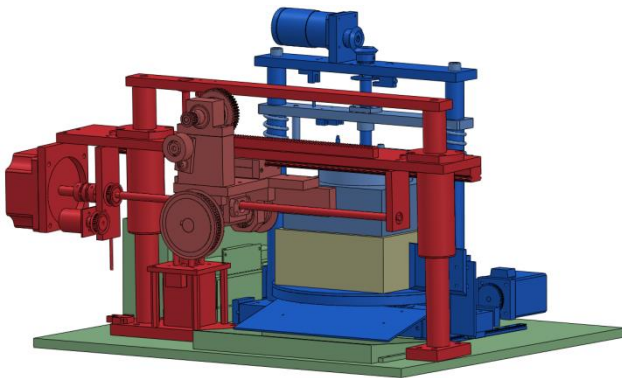


(8) 斜め切断終了

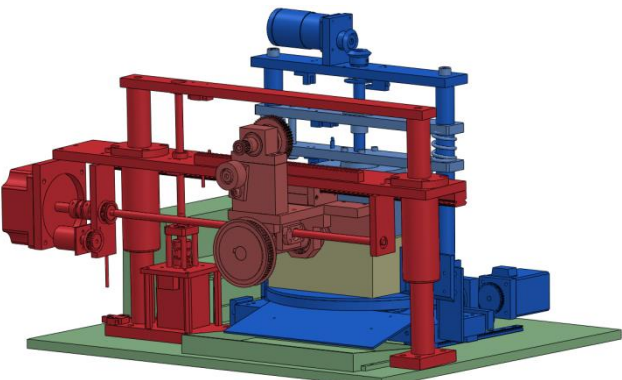




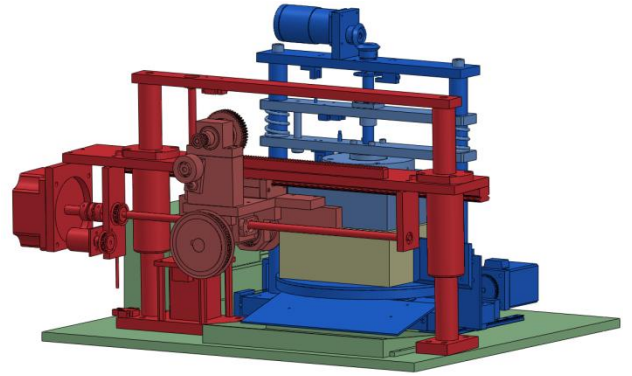
(9) 上昇



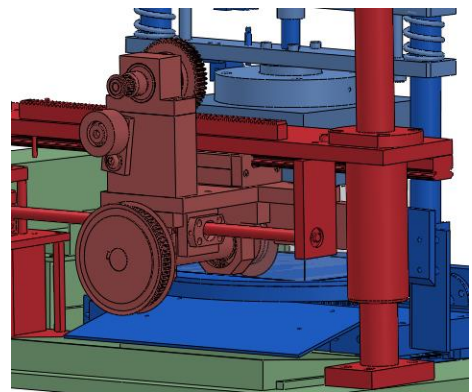
(10) 一定量降下



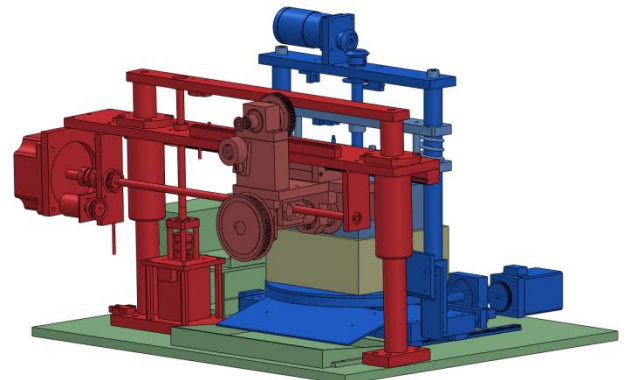
(11) 斜め切断



(12) 一定量降下



(13) 斜め切断 (刃が最下点に到達)



(14) 最下点到達位置で上昇



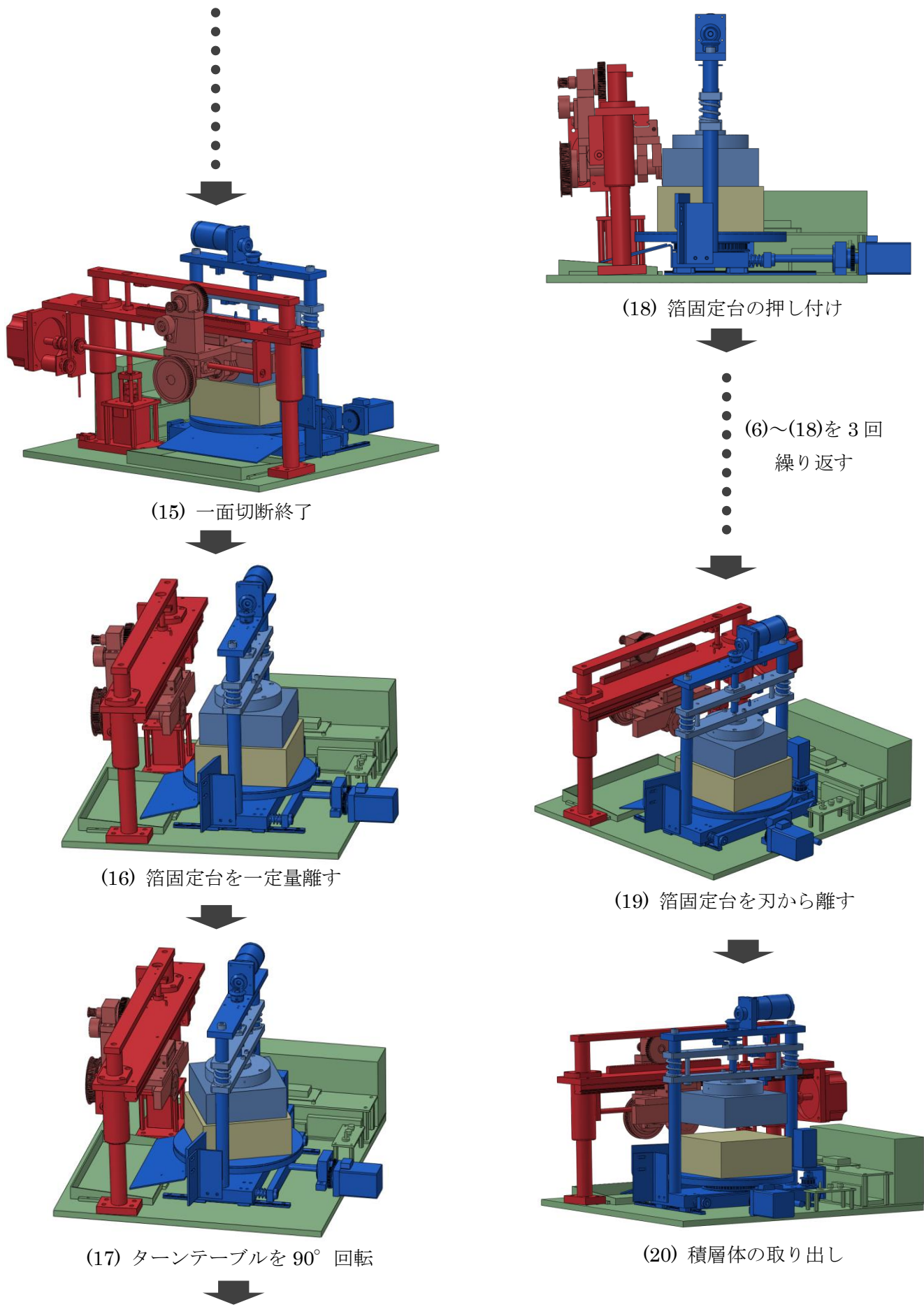
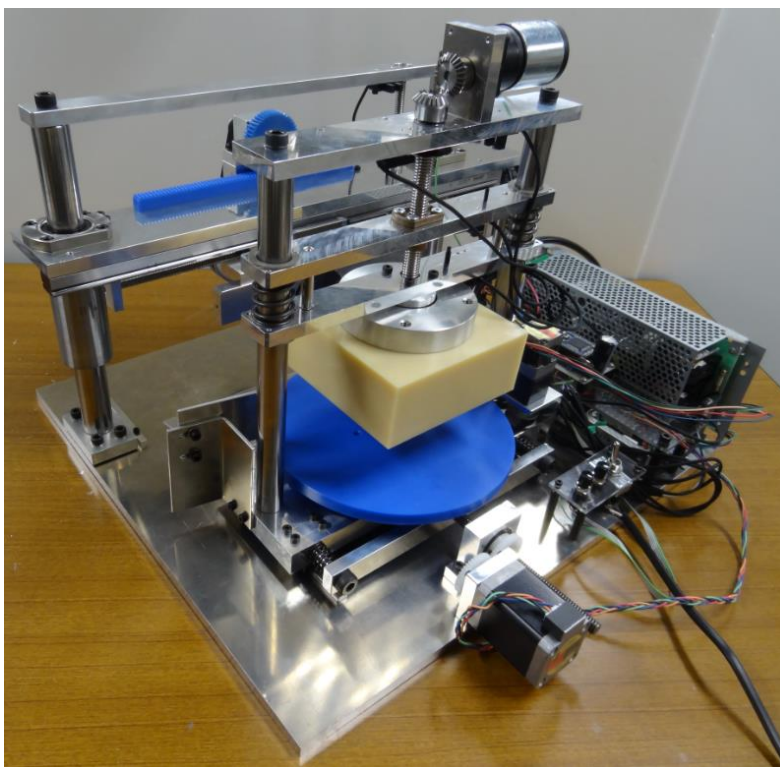


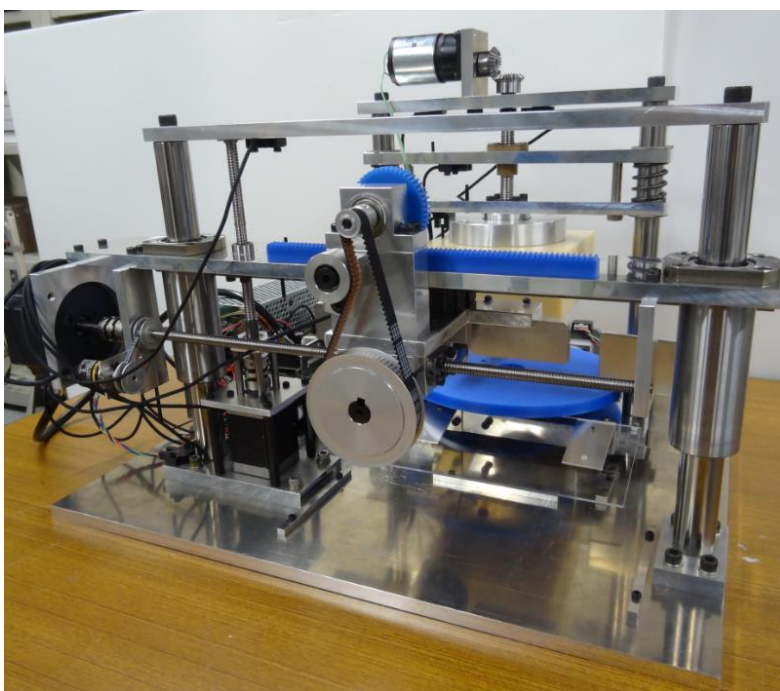
図 3.11 自動運転の各作業の流れ

3.5 自動切断装置の試作

実際に試作した積層体四面を自動で切断できる装置を図 3.12 に示す。



正面



背面

図 3.12 製作した積層体四面の自動切断装置

3.6 切断実験

試作した積層体四面の自動切断装置を用いて、アルミ箔の積層体を切断する検証実験を行った。箔固定機構の動作は予定通りスムーズに行われ、箔固定ブロックに刃を押し付けながら各面をほぼ良好に切断することができたが、次のような問題点も見られた。

- ・箔の切りくずが予想以上に多く、試作した受け皿では十分でなかった。残った切りくずが刃と積層体の間に挟まり、若干、切断面が乱れている部分があった。装置全体を少し上に持ち上げ、下部に切りくずを落とすような改良が望まれる。

- ・4面全て切断するのに20分弱かかった。各モータの制御などを見直し、高速化する必要がある。あるいは、切断面のきれいさを少し犠牲にして、切り込み量を2～3倍に増やすことも考えられる。

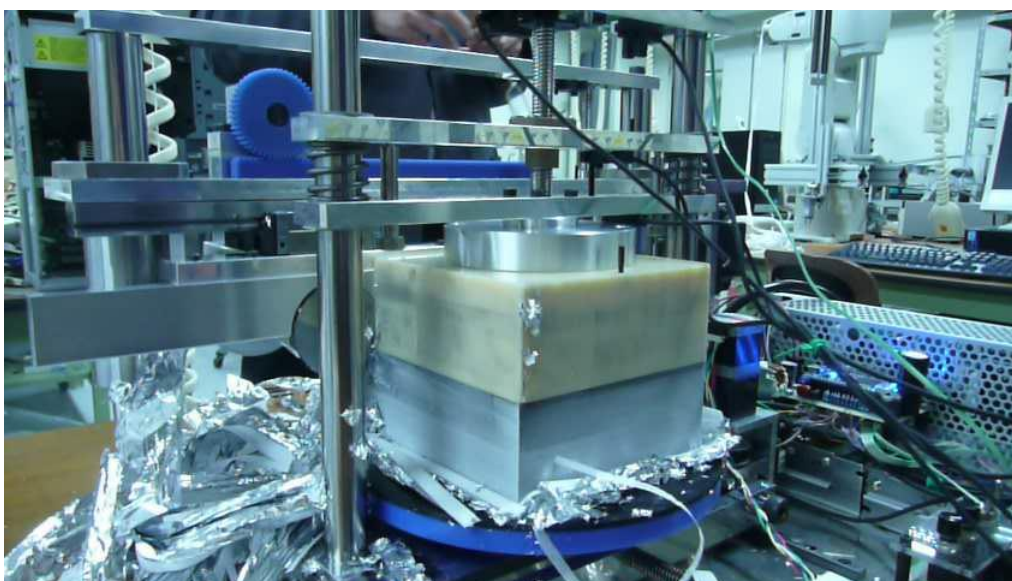


図 3.13 切断前後の積層体の様子

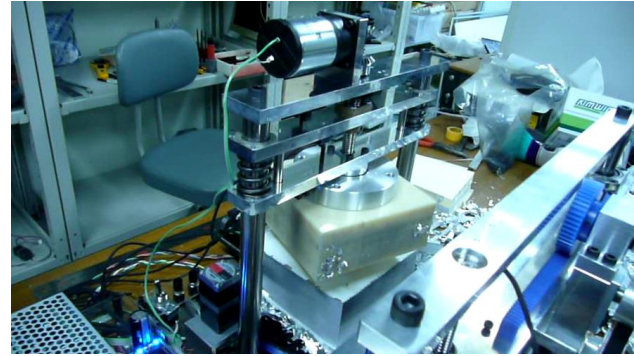
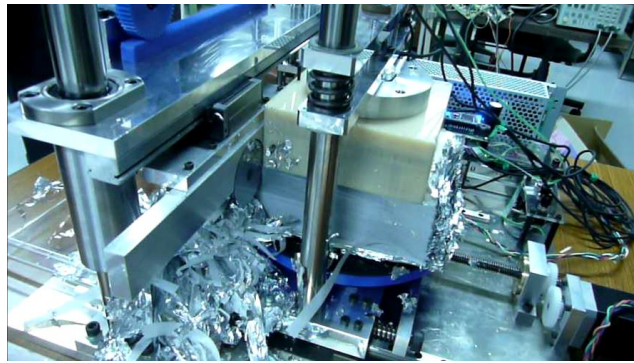
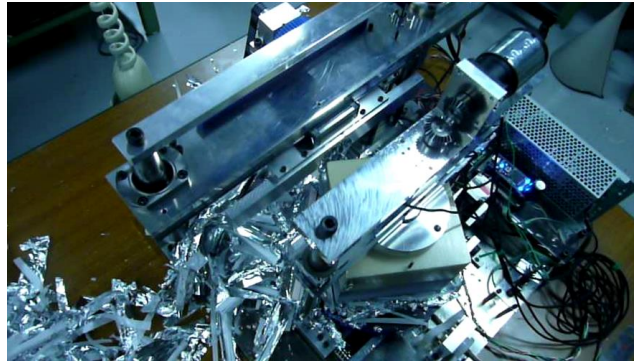
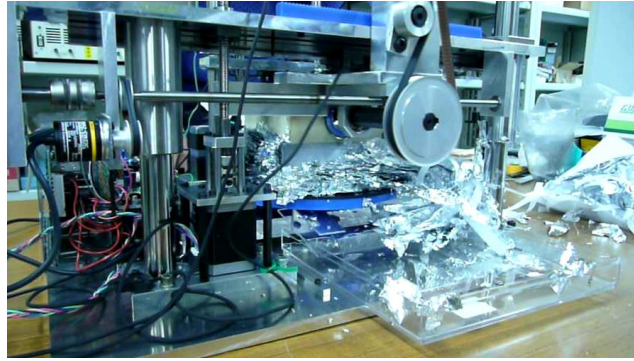
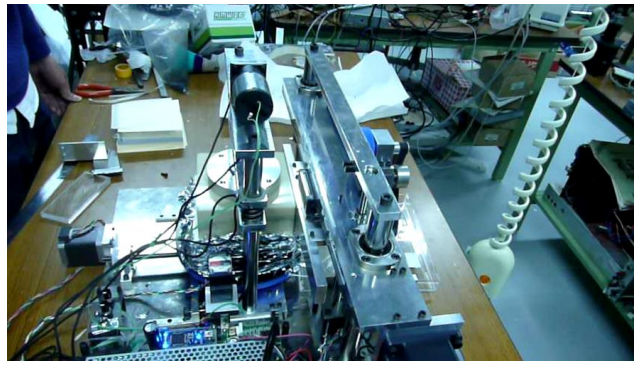


図 3.14 動作検証

第4章 まとめ

箔と箔合紙の積層体の4面を自動で切断する裁断機の開発を目指して、本年度は、積層体一面の自動切断装置のさらなる改良点の検討を行った上で、積層体四面を自動で裁断できる装置の設計・試作を行った。切断面の良好さと機構のコンパクト化を両立させるため、箔固定ブロックの際を切れるように箔固定ブロックを刃に押し付けながら切断する機構や、刃の一部分の摩耗を避けるようにワンウェイクラッチを用いて一方向にだけトルクを伝える機構、積層体をずらさず4面を切断するため箔固定ブロックを積層体に押し付けたままターンテーブルを回転させる機構など、より実用化に近づけた設計を行った。アルミ箔の積層体を用いた検証実験を行った結果、切断動作には問題がなかったが、切りくずの除去と動作の高速化について課題が残った。今後は、この課題について改良を行い、さらに、コストや作業のしやすさなども考慮した実用機を完成させたいと考えている。

謝辞

本研究を行うにあたり、金沢箔技術振興研究所の皆様や（株）戸出惣次郎商店 諸江泰彦氏より御協力や御助言、試料等の御提供を頂きました。また、研究開発において本学博士前期課程2年の堀部裕太氏の協力を得ました。ここに厚く御礼申し上げます。

発表

Y. Horibe, H. Seki, Y. Kamiya, M. Hikizu, “Automation of Cutting for Block of Piled Gold Leaves and Papers”, Proceedings of the 15th International Conference on Precision Engineering (ICPE2014), pp.806-811, 2014.7