

振動工具を採用した自動切断加工機の開発研究

石井信義・斎藤雅樹・鬼鞍宏猷*・栗山保士**
材料開発部・九州大学*・(有)栗山機工作所**

Development of Automatic Cutting Machine Using Vibration Blade

Nobuyoshi ISHII・Masaki SAITO・Hiromichi ONIKURA*・Yasushi KURIYAMA**
Material Development Division・Kyushu University*・Kuriyama Machine Maneuvering Inc.**

要旨

本研究の切断加工は、被加工物の切断送り方向に対してダウン方向に低周波領域の回転振動を付加して行うものである。本報告においては、回転振動切断加工時の切断メカニズムの理論解析(力学的要因,幾何学的要因)について解説すると共に、当センターの技術シーズを基に(有)栗山機工作所にて切断加工機(プロトタイプという)と階段状工具刃物(ノンセッティングソウ:NSSという)の開発製作を行った。

その結果、

- (1) 理論的解析については、NSSとして最適と考える「刃先がナイフ状で、階段状の切刃」を用いて回転振動切断を行うときの①NSSの材質・形状についての検討②有効刃物角の解析③切断抵抗の理論解析を行った。このことによって、回転振動切断の技術展開を容易に進めることが可能となった。
- (2) プロトタイプの開発刃はセンターの実験データやデザイン設計に基づいて行った。プロトタイプはほぼ設計図どおりに完成した。NSSについては2品種(A,Bタイプという)を開発製作した。プロトタイプを開発製作したことによって振動切断の実用化に向けた加工実験が可能となった。
- (3) 回転振動切断加工についての実験値と理論値の検討を今後進めることが可能となった。

1. はじめに

本県地場産業の一つである木材加工工場では、木材を切断分割する際に発生する切り屑と騒音の問題があり、これらの問題を解決するために取り組んだ研究開発である。¹⁾²⁾³⁾

これは、NSSを低周波によって回転振動させ、その振動で木材を切断分割(以下切断という)する方法である。この研究開発は、切断メカニズムの理論的解析(力学的要因,幾何学的要因,材料学的要因),工具刃物の開発(形状,耐久性,耐熱性,耐摩耗性等)を進め技術の蓄積を図ることと、開発技術は木材のみならず軟質材等の切断にも利用の可能性を拡大することにある。

本年度は、理論的解析を進めるために①NSSの材質・形状についての検討②有効刃物角の解析③切断抵抗の理論解析を行った。また、プロトタイプのデザイン設計とNSSの開発製作を行った。本報告は12年度に実施した研究内容について述べる。

この研究の目的は、木材加工工場において、木材を切断分割する際に、切り屑の発生と騒音を押さえ快適作業環境を提供することを目標とした、木材の切断加工機の開発にある。

2. 研究方法

2.1 理論

2.1.1 NSSの材質・形状についての検討

ナイフ状の刃先が木材の中に進入して切断できるためには、被削材である木材がナイフ状の刃物の体積に等しい体積を吸収する必要がある。すなわち木材が吸収するか、種々の方向に変化が必要となる。これは大きな変形抵抗を要するので

- ・できるだけナイフ状の刃物の体積が小さいこと、すなわち刃物の厚さが薄いこと。ただし、薄くすると刃物の剛性が下がるので、大きな張力をかけて切断する必要がある。
- ・刃物と木材の摩擦係数を減少できる材料を選定すること。刃物本体材料には高速度工具鋼を用い、ダイヤモンド・ライク・カーボン(DLC)をコーティングすることが望ましいと思われる。金属切削の場合は超硬合金、TiN,ダイヤモンドなどの材質に比べ摩擦係数が約半分(0.4→0.2)になることが推奨される。また、耐摩耗性を高め長寿命化するためには、刃物表面にダイヤモンドコーティングするか、微粒ダイヤモンドを電着することが良いと思われる。ただし、いずれの場合も摩擦係数は

ほとんど減少しないと思われる。

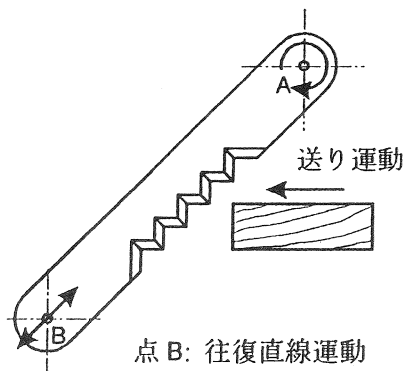
2.1.2 有効刃物角の解析

Fig. 1に示すNSSによる木材の切断について、切断抵抗に大きな影響を与える因子である有効刃物角の時間的な変化を調べた。切刃は、等しい長さの水平刃と垂直刃からなり、傾斜角は45°であると仮定した。被削材に相対的に切刃が回転運動と送り運動を行う（トロコイド曲線を描くと）仮定し解析を進めたxおよびyをそれぞれの切刃上の点の水平および垂直方向変位、fを振動周波数(Hz=1/s)、aを切断箇所における切刃の回転半径(m)、Fを送り速度(m/s)、tを時間(s)とすると、切刃上のある局所領域内の点の速度は

$$\dot{x} = F + 2\pi af \cos 2\pi ft \quad \dot{y} = -2\pi af \sin 2\pi ft$$

で表される。ここで、 L_h および L_v をそれぞれ水平刃および垂直刃の長さ(m)、 ϕ_h および ϕ_v をそれぞれ水平刃および垂直刃の刃直角刃物角(rad)、 ϕ_{he} および ϕ_{ve} をそれぞれ水平刃および垂直刃の有効刃物角(rad)、 θ_h および θ_v をそれぞれ水平刃および垂直刃の切断方向角(rad)と仮定すると、水平刃および垂直刃の有効刃物角 ϕ_{he} および ϕ_{ve} は次式で表される。

点 A: 回転運動



点 B: 往復直線運動

Fig. 1 切断状況

Fig. 2には刃直角刃物角の有効刃物角との関係を示す。

$$\tan(\phi_{he}/2) = \tan(\phi_h/2) \cdot \cos \theta_h \quad (\dot{y} < 0 \text{ の場合のみ存在})$$

$$\tan(\phi_{ve}/2) = \tan(\phi_v/2) \cdot \cos \theta_v \quad (\dot{x} > 0 \text{ の場合のみ存在})$$

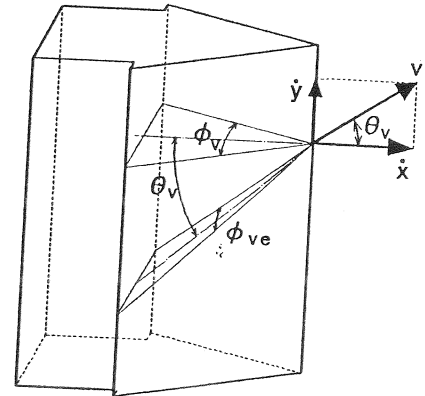
ここで $\tan \theta_h = -\dot{x} / \dot{y}$ ($\dot{y} < 0$ の場合のみ存在)

$$\tan \theta_v = \dot{y} / \dot{x} \quad (\dot{x} > 0 \text{ の場合のみ存在})$$

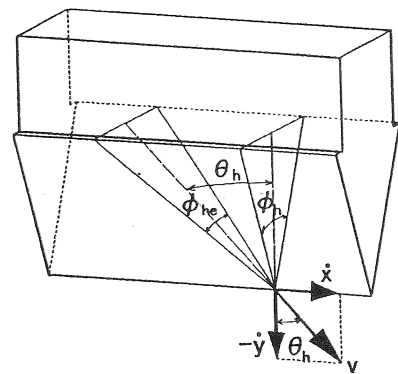
の関係が存在する。

それぞれの刃の有効刃物角の回転1周期の変化の計算例をFig. 3に示す。これは水平刃と垂直刃の長さがともに5mmで振幅が5mmの場合である。そのとき、水平刃のみが切断に作用し、0.0025~0.005sの間において有効刃物角が20° →

0°に変化することがわかる。

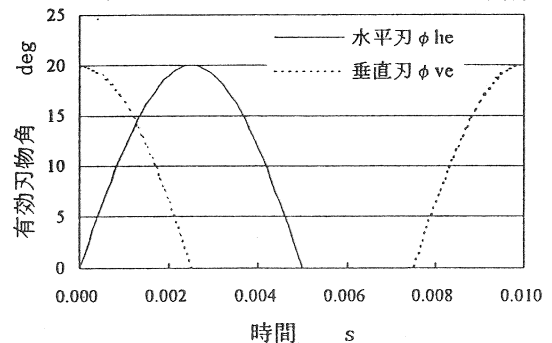


(a) 垂直刃の場合



(b) 水平刃の場合

Fig. 2 刃直角刃物角と有効刃物角との関係



$L_h=5\text{mm}$, $L_v=5\text{mm}$, $F=20\text{mm/s}$, $f=100\text{Hz}$, $a=5\text{mm}$

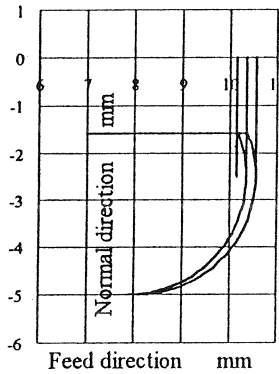
Fig. 3 有効刃物角の回転1周期の変化の例

2.1.3 切断抵抗の理論解析

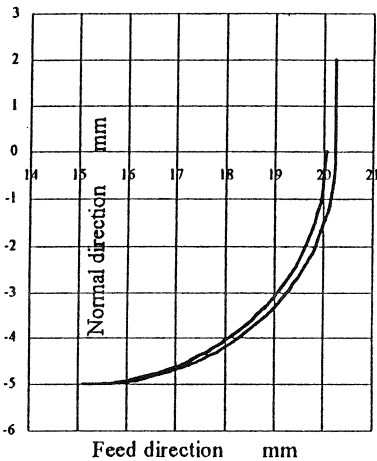
切刃の1回転周期における切断領域は、水平刃と垂直刃の長さ L_h , L_v と切断領域での回転半径 a の大きさの関係により異なる。Fig. 4には、(a)回転半径 $a=2.5\text{mm}$ の場合、(b)回転半径 $a=5\text{mm}$ の時の水平刃と垂直刃により切断される領域をそれぞれ青色と赤色で示す。これらの図から、 a の値によって、水平刃と垂直刃により切断される領域および面積が異なり、時間の経過とともに変化することがわかる。

HBをブリネル硬さ($\text{Pa}=\text{N/m}^2$)、 T を刃厚の最大値(m)、 θ を刃のテーパ部の幅(m)、 K_v を刃に作用する垂直分力、 K_h を刃に作用する水平分力、 μ を摩擦係数、 m を同時作用刃の枚数

とする。切刃の背部はFig. 2のように逃げを有するため、切刃と木材との接触は楔部（ナイフ状の部分）のみで発生するものとする。



(a) 回転半径 a=2.5mm の場合



(b) 回転半径 a=5mm の場合

Fig. 4 水平刃と垂直刃により切断される領域

いま、各振動サイクルの開始から t_0 秒後において切断を開始すると、 t_0 は次式を満たす。

$$a(\sin 2\pi ft_0 - 1) + F\{t_0 + 3/(4f)\} = 0$$

ここで、 n を整数とし、回転振動半径 a の二つの場合について、切断抵抗の解析を行う。

(1) $a=2.5\text{mm}$ の場合

(i) $n/f \leq t \leq n/f + t_0$ において

水平刃は作用しないし、垂直刃も作用しない。

(ii) $n/f + t_0 \leq t \leq (n+1/4)/f$ において

$t' = t - n/f$ ($t_0 \leq t' \leq 1/(4f)$)とし、Fig. 5の刃の

断面形状を考慮すると

$$\text{水平刃：作用幅 } B_h = a(\sin 2\pi ft' - 1) + F\{t' + 3/(4f)\}$$

$$\text{水平分力 } K_{hh} \approx m \cdot HB \cdot B_h \cdot 2 \cdot \mu \cdot \sin \theta_h$$

$$\text{垂直分力 } K_{hv} \approx m \cdot HB \cdot B_h \cdot 2 \cdot \{\mu \cdot \cos \theta_h + \sin(\phi_h/2)\}$$

$$\text{垂直刃： } B_v = a(1 - \cos 2\pi ft')$$

$$\text{水平分力 } K_{vh} \approx 2 \cdot m \cdot HB \cdot B_v \cdot \ell \cdot \{\mu \cdot \cos \theta_v$$

$$+ \sin(\phi_v/2)\}$$

$$\text{垂直分力 } K_{vv} \approx 2 \cdot m \cdot HB \cdot B_v \cdot \ell \cdot \mu \cdot \sin \theta_v$$

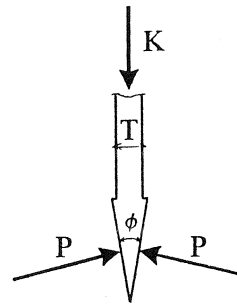


Fig. 5 刃の断面と作用力

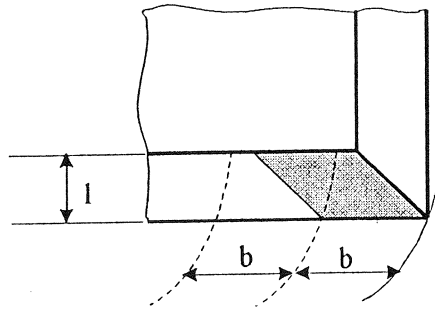


Fig. 6 刃と木材の接触領域

ここで、回転振動1周期中に木材と接触する垂直刃の幅は b であるが、その背後の切刃から ℓ 幅の部分も接触していることに注意する必要がある。Fig. 6には刃と木材の接触領域を示した。

$$\therefore K_h = K_{hh} + K_{vh}$$

$$K_v = K_{hv} + K_{vv}$$

(iii) $(n+1/4)/f \leq t \leq (n+1/2)/f$

水平刃：作用幅 $B_h = b$ (一定)

$$\text{水平分力 } K_{hh} \approx 2 \cdot m \cdot HB \cdot b \cdot \ell \cdot \mu \cdot \sin \theta_h$$

$$\text{垂直分力 } K_{vh} \approx 2 \cdot m \cdot HB \cdot b \cdot \ell \cdot \{\mu \cdot \cos \theta_h + \sin(\phi_h/2)\}$$

ここで(ii)の場合と同様、回転振動の1周期中に木材と接触する垂直刃の幅は b であるがその背後の切刃から ℓ の幅の部分(平行四辺形)も木材と接触していることに注意する必要がある。

垂直刃：作用しない

(iv) $(n+1/2)/f \leq t \leq (n+1)/f$ において

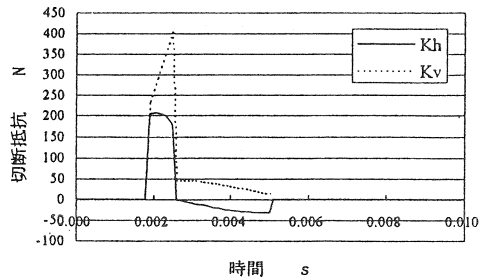
水平刃も垂直刃も作用しない

Fig. 7に示す計算結果によると、0.0018s~0.005sの時間帯のみ切断抵抗を発生するように見えるが、実際の加工においてはそれ以外の時間帯においても切刃側面と木材との間の摩擦抵抗や振動切断による抵抗の平均化の効果のため、計算とは異なる結果になるものと推測される。

(2) $a=5\text{mm}$ の場合

(i) $n/f \leq t \leq n/f + t_0$ において

水平刃も垂直刃も作用しない



$a=2.5\text{mm}$, $L_h=5\text{mm}$, $L_v=5\text{mm}$, $\ell=2\text{mm}$, $F=20\text{mm/s}$, $f=100\text{Hz}$
 $m=5$, $\text{HB}=20\text{MPa}$, $\mu=0.4$, $\phi=20^\circ$

Fig. 7 回転振動1周期における水平分力と垂直分力の変化(計算結果)

(ii) $n/f+t_0 \leq t \leq (n+1/4)/f$ において

水平刃: 作用幅 $B_h=b$ (一定)

$$\text{水平分力 } K_h \approx 2 \cdot m \cdot \text{HB} \cdot b \cdot \ell \cdot \mu \cdot \sin \theta_h$$

$$\text{垂直分力 } K_v \approx 2 \cdot m \cdot \text{HB} \cdot b \cdot \ell \cdot \{ \mu \cdot \cos \theta_h + \sin(\phi_h/2) \}$$

垂直刃: 作用しない

(iii) $(n+1/4)/f \leq t \leq (n+1/2)/f$ において

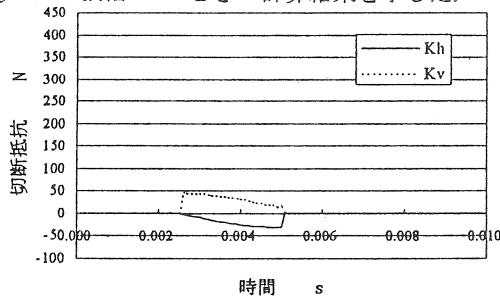
水平刃も垂直刃も作用しない

(iv) $(n+1/2)/f \leq t \leq (n+1)/f$ において

水平刃も垂直刃も作用しない

Fig. 7, 8の結果の比較から, 回転振動振幅 a を刃の長さ $L_h=L_v=5\text{mm}$ に一致させると垂直刃が切断に関与しなくなるため, 抵抗の顕著な減少が見られる。

Fig. 8には振幅 5mm のときの計算結果を示した。



$a=5\text{mm}$, $L_h=5\text{mm}$, $L_v=5\text{mm}$, $\ell=2\text{mm}$, $F=20\text{mm/s}$, $f=100\text{Hz}$
 $m=5$, $\text{HB}=20\text{MPa}$, $\mu=0.4$, $\phi=20^\circ$

Fig. 8 回転振動1周期における水平分力と垂直分力の変化(計算結果)

ただし, 切断抵抗の計算に関しては, 次のようないくつかの問題が存在する。

- ・木材のブリネル硬さは文献に示されてはいるが, 押し込む領域の面積だけでなく押し込み深さにも関係があると推測される。
 - ・切刃稜に作用する力を推測することが現在のところできない。
 - ・摩擦係数の正確な値が不明である。
- 一応の切断抵抗の解析を行うことができることを示し

た。しかし, 幾何学的な関係で切断の状況がかなり異なる。この解析により, 切断抵抗が小さくなるような条件を選定することが可能になるものと思われる。

2.2 プロトタイプのデザイン設計

2.2.1 デザイン

プロトタイプの実用化を図るには, 部品で構成した仕上り形状が必要である。仕上り形状の色や形が購買者に与えるイメージは, 購入動機を左右する。プロトタイプのデザインコンセプトは新しい機能を備えた, 鉄の塊ではなく優しいイメージとした。同時に操作性が簡便であることや安全性が高いことなどを考慮した。Fig. 9にはプロトタイプの完成した製品イメージを示した。

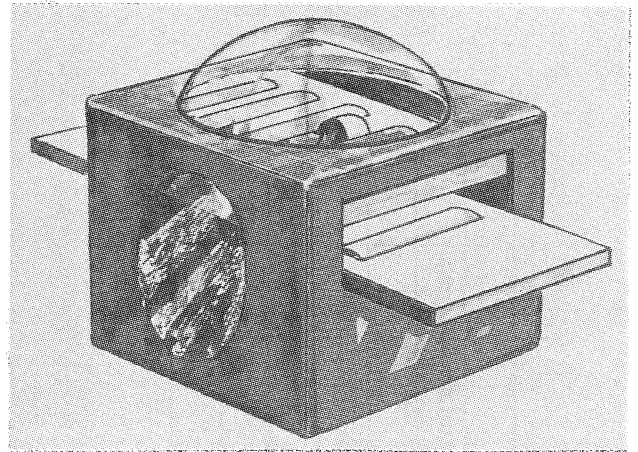


Fig. 9 デザイン

2.2.2 設計

プロトタイプの仕上り寸法は幅は $700 \times$ 奥行きは $1,200 \times$ 高さは $1,100$ (mm)とした。部材は鋼材とした。

仕様は

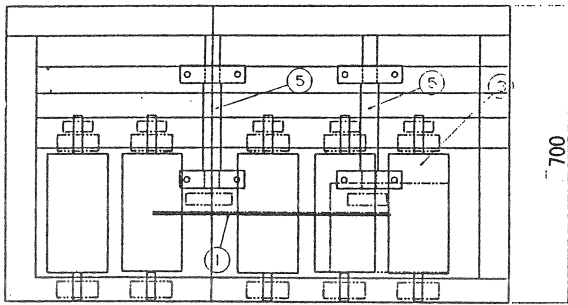
- 1) 製作には回転振動切断技術シーズを使用すること。²⁾³⁾
- 2) 切断するときの加工材の寸法は幅は $300 \times$ 厚さ 100 (mm)の木材が切断可能なこと。
- 3) 加工材の送り速度は $5 \sim 15\text{m/min}$ の範囲とし, 加工材の寸法に合わせて制御可能なこと。
- 4) NSSの切刃の振動回転数は最高 $7,000\text{rpm}$ とし, 加工材の寸法や材質に合わせて制御可能なこと。
- 5) 振動回転片振幅は 2.5mm とすること。
- 6) NSSの形状は技術シーズを基に開発製作すること。²⁾³⁾
- 7) 構成部材の加工精度を高めプロトタイプにゆがみや振動などが生じないこと。

Fig. 10には設計図を示した。

2.2.3 NSSの開発

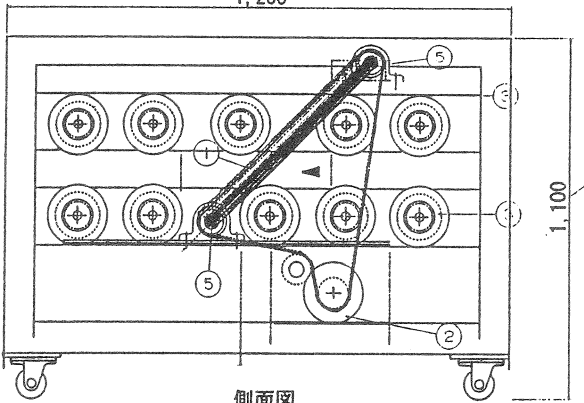
プロトタイプに取り付け使用するNSSの素材は, 高速度工具鋼とした。形状の寸法は長さは $440 \times$ 幅は 30 (mm)とした。厚さは $0.4, 0.6, 1.2$ (mm)の3種類とした。刃先と刃先間のピッチは $3.5, 8$ (mm)とし, 刃先の形状はA, Bタイプの2種類とした。

Fig. 11には設計したNSSを示した。



平面図

①刃物②刃物駆動モーター③送りローラ④ベースフレーム⑤刃物主軸
1,200



側面図

Fig. 10 設計図

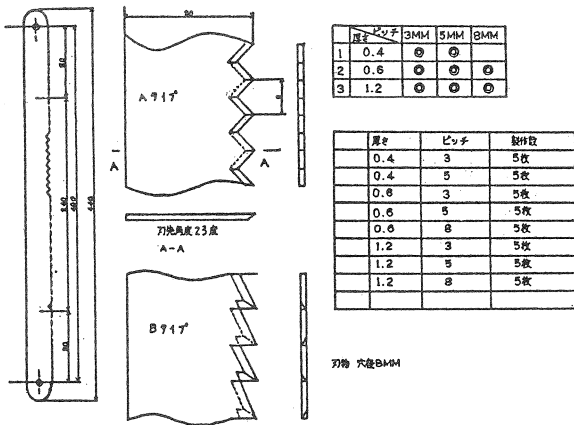


Fig. 11 NSS

3. 結果及び考察

3.1 理論

回転振動切断技術の理論解析については、前項2.1で述べた通りである。この解析を基に今後は、実証実験を行い技術資料の整備を図る。

3.2 プロトタイプの開発

3.2.1 プロトタイプ

プロトタイプはデザイン設計にもとずいて、県内K工作所にて開発製作した。ほぼ設計や仕様に沿ったプロトタイプが完成した。プロトタイプの仕上がり寸法は、幅は700×ok

奥行きは1,200×高さは1,100(mm)である。重量は約1トンである。被加工材の送り速度は5~15(mm/min)の間で変換速度調整可能とした。NSSの振動回転は最高数で7,000rpmとした。振動回転の片振幅は2.5mmとした。送り速度及び回転数の調整はインバータ制御を採用した。このプロトタイプでの切断実験は平成13年度に実施する計画である。

Fig. 12にはプロトタイプの内部構造を示した。Fig. 13には全体の姿を示した。

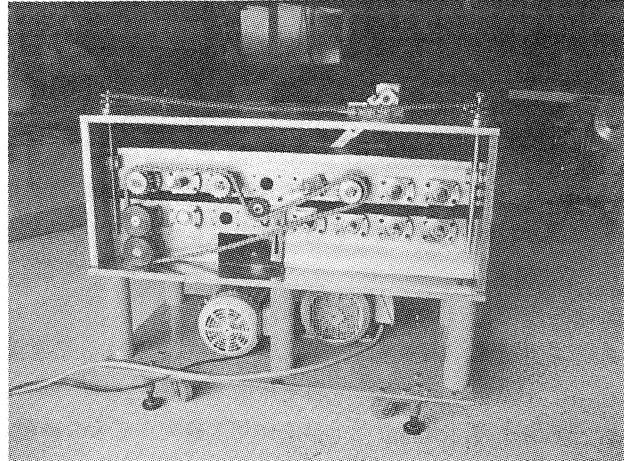


Fig. 12 内部構造



Fig. 13 全体の姿

3.2.2 NSSの開発製作

NSSの素材は高速度工具鋼を使用した。寸法は長さは440×幅は30(mm)である。厚さは0.4, 0.6, 1.2(mm)の3種を試作した。刃部の形状はAタイプとBタイプとした。

Fig. 14には試作したAタイプの一部を示した。

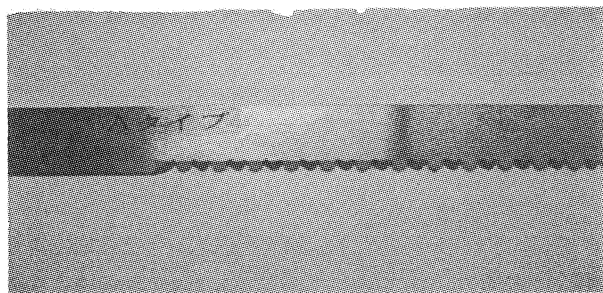


Fig. 14 NSS(Aタイプ)

4. おわりに

今回は、回転振動切断技術の理論的解析と加工機の開発製作を進めた。この結果から理論を基礎とした実験データとの整合性等技術ノートの作成が可能となった。また、プロトタイプを開発製作したことで技術シーズを採用した切断加工の実用化が一步前進したと考える。

次年度には、理論解析と切断抵抗との関連性の検討、プロトタイプを使った切断実験を行い、回転振動切断技術の確立を図る計画である。

5. 謝辞

本研究の遂行にあたり、工具刃物の開発試作に関して貴重なご意見アドバイス頂きました。天龍製鋸（株）竹村増吉取締役技術部長に対し感謝の意を表します。

参考文献

- 1). 石井信義, 山本幸雄: 平成9年度研究報告大分県産業科学技術センター, 160-163
- 2). 石井信義, 大内成司: 平成10年度研究報告大分県産業科学技術センター, 109-113
- 3). 石井信義, 斎藤雅樹: 平成11年度研究報告大分県産業科学技術センター, 93-96
- 4). 木材加工機械の騒音測定方法: 日本規格協会
JIS B 6521
- 5). 切削加工: 海青社, 106-112
- 6). チップソー: 槇書店, 2-91