振 動 切 削 に 関 す る 研 究*
(ポアンカレ写像による加工面の評価)早乙女 辰男^{*1}, 佐藤 啓仁^{*2}Study on Vibration Cutting
(Profile Analysis of Machined Surface using Poincaré Map)

Tatsuo SOUTOME and Keijin SATO

It is well known that the vibration cutting process utilizing a pulsating cutting force is suitable for precision machining. Dynamic motion of the work is theoretically analyzed on a linear tool-work forced vibration system. The purpose of this study is to analyze the nonlinear vibration phenomena on vibration cutting. In this report, experiments are carried out using the 2-dimensional vibration cutting device to confirm the nonlinearity of the dynamic motion of work, and the profile of a machined surface in such a case. The trajectory in a 3-dimensional phase space of work displacement, velocity and time, is mapped on the Poincaré section of displacement and velocity. On the mapped points, such nonlinear vibration phenomena as subharmonic vibration, quasi-periodic vibration and bifurcation, are shown. And It is suggested that the profile of a machined surface can be analyzed by using the Poincaré map.

Key Words: Cutting, Forced Vibration, Nonlinear Vibration, Vibration Cutting, Dynamic Motion, Poincaré Map

1. 結 言

精密加工方法の一つに振動切削方法がある。この方法は工具に規則的な振動数と振幅を与えて切削する方法で、切削時に発生する切削力波形をパルス状波形とし、これを工作物に連続して作用させることで精密加工を行うものである。工具に振動を与えない普通切削と比較し、発熱を少なくして切削抵抗を軽減させ、加工精度や表面粗さなどを向上させることができる。限部はこの効果を説明するのに工具-工作物振動系を線形力学モデルとして扱い解析し、報告している⁽¹⁾。著者の一人もこの解析に基づいて限部とともにいくつかの研究成果を報告している⁽²⁾⁽³⁾。

しかし、現実の工具-工作物系のような物理系には、非線形特性が常に内在していると考えるのが自然である。事実、細径深穴の加工や比較的剛性の少ない外周旋削加工において、条件によっては一様な加工表面が得られないことやびり現象などに直面するなど非線形性が関係していると思われる現象が生じることがある。このような現象に対して、線形理論の立場からで

は現象の解析が困難であるため実用の際には経験的に切削条件を変えるなどして非線形現象を回避している。

本研究は、このような非線形性に基づくと見られる現象までも説明できる力学モデルを提案し、その解析結果から振動切削を行う上での最適加工条件などを求めることを目的に、非線形論の立場から考察しようとするものである。すなわち、振動切削はその名の示すとおり、工具を強制振動させて行う加工であるので、非線形強制振動論の立場からとらえるのが自然と考えられ、また生じている現象の把握には工具の振動周期に同期した時系列に、工作物の変位や表面性状を離散化してデータ化してみる。つまりポアンカレ写像⁽⁴⁾を利用するのが便利であると考えられる。

本報では、振動周期と工作物の変位あるいは表面性状の関係を、ポアンカレ写像を用いて観測した結果について報告する。

2. 振動切削と非線形問題

図1に二次元振動切削機構と線形モデルとしての工具-工作物振動系を示す。切削抵抗にまさる振動エネルギーを工具に与え、工具切刃先端を定振動数 f 、定振幅 a で切削方向に強制振動させ、切削速度 v に対し、

* 原稿受付 平成5年9月10日。

^{*1} 正員, (株)パイロット (〒254 平塚市西八幡1-4-3)。^{*2} 正員, 宇都宮大学工学部 (〒321 宇都宮市石井町2753)。

$v < 2\pi af$ を満足するようにして切削する。図1(a)に示すように切刃を0点を中心に振動させ、工作物に切削送りと与えて切削を行うと、正弦波振動する工具の1サイクル中太線で示す時間のみ切刃と工作物が接触する。すなわち、太線部分の時間のみ工作物にパルス状の切削力を作用させて小刻みに切りくずを生成し、それ以外の時間にはすくい面と切りくずが離れて切削力はその間零になる。このようにして、 $A_1B_1-A_2B_2-A_3B_3\cdots$ と連続して規則的に接触させると工具の振動周期 T における正味切削時間 t_c を有するパルス状切削力を作用させる切削機構となる。

このパルス状の切削力波形が図1(b)に示すモデル化した線形振動系に作用した時の工作物の挙動について考える。振動切削機構から得られる背分力方向のパルス状切削力波形

$$P_t(t) = \frac{t_c}{T} \cdot P_t + \frac{2}{\pi} P_t \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \sin n \frac{t_c}{T} \pi \cos n \omega t \quad \cdots \cdots (1)$$

が背分力方向である x 方向のみを考慮した1自由度振動系に作用した時の工作物の変位は

$$x = \frac{t_c}{T} \cdot \frac{P_t}{k_x} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\frac{P_t}{k_x} \cdot \frac{2}{n\pi} \sin n \frac{t_c}{T} \pi}{\sqrt{\left(1 - n^2 \frac{\omega^2}{\omega_n^2}\right)^2 + 4n^2 \nu^2 \frac{\omega^2}{\omega_n^2}}} \times \sin(n\omega t + \phi_n \varphi_n) \quad \cdots \cdots (2)$$

$$\varphi_n = \tan^{-1} \frac{1 - n^2 \frac{\omega^2}{\omega_n^2}}{2n\nu \frac{\omega}{\omega_n}}$$

図1 振動切削機構と工具-工作物振動系

で表される。ここに、 k_x ；工作物のばね常数、 ω ；工具の角振動数、 ω_n ；工作物の角固有振動数、 $\nu = c_x/c_{xc}$ （ c_x ；工作物の粘性減衰係数、 c_{xc} ；工作物の臨界粘性減衰係数）を示す。ここで、 $\omega \gg \omega_n$ の場合、式(2)の第2項は小さな値となり省略しうるので $x = (t_c/T) \cdot (P_t/k_x)$ で表される常数項のみとなる。この式は工作物の変位を時間的に変動しない静的成分のみとし、しかも高速普通切削による切削力 $P_t(t) = P_t \text{ mean} + p_t \sin \omega t$ ($P_t \text{ mean}$ ；平均切削力、 p_t ；変動成分の振幅)が作用した時の工作物変位 $x = P_t/k_x$ に比べ t_c/T 倍減少させることを示す。この効果を限部は不感振動切削機構⁽⁵⁾と名づけている。著者の一人もこの理論解析に基づいて実験を行い、いくつかの研究成果を得ているが、切削条件によっては期待どおりの成果が得られず、加工条件を変えるなどして対応するケースも少なくない。この原因の一つには、機械構造系や工具・工作物間に介在すると見られる非線形特性に基づく異常現象が関係していると考えられるので、著者らはこの非線形振動問題を取上げ考察することにした。

この振動切削に非線形特性を考慮した解析を行うに当たっては、はじめに十分な現象観測が必要と思われる。本報では低速二次元振動切削を試み、周期的なパルス状の強制外力が加えられる振動系での三次元位相空間 $(x, \dot{x}, t)$ における工作物の挙動を $(x, \dot{x})$ 断面によるポアンカレ写像によって観察することにし、さらにこのポアンカレマップと加工面を対応させることによって切削面の評価を試みることにする。

図2 工作物変位-速度測定システム

図 3 実験装置

3. 実験装置および実験方法

図 2 に切削時の工作物挙動をポアンカレ写像によって観察するための測定システムを示す。振動切削により加工表面の品位と形状精度が向上するのであるから、切削時の工作物変位はかなり微小であることは述べるまでもない。そこで振動切削時の切削効果に影響を与えず、かつ工作物の挙動を調べる必要から、図 2 に示すような工作物を測定子として利用することにした。両端を固定して曲げ振動系を構成することにし、切削時に発生する工作物の変位を渦電流形のセンサによって測定する。ここで工作物の固定スパン S は剛性を変化させた予備テストの結果から本実験では $S = 50 \text{ mm}$ とした。センサによって測定される工作物の変位信号 x とこれを微分して得られる速度信号 $\dot{x}$ をオシロスコープに入力してリサージュ図形を描き、さらにこの位相面軌道 $(x, \dot{x})$ からポアンカレマップを描くためにオシロスコープ z 軸の輝度変調機能を利用して位相平面 $(x, \dot{x})$ にストロボ点列を得ることにする。このための周期的なストロボ信号を図 2 に示すようにセンサによって測定される工具の正弦振動変位信号を波形修正回路によって修正して得られる輝度変調時間の短いパルス信号としこれを利用する。そしてこれを撮影装置により 1 s パルプ状態にして約 20 000 ドットの点列を撮影、記録することにした。

図 3 に実験装置を示す。図 3 (a) に工具振動系の構造を示す。電わい振動子(1)によって得られる振動振幅を縦振動ホーン(2)によって伝達拡大し、さらにこの振動エネルギーを 5 次の曲げ振動バイトシャंक(3)に伝達するためにホーン端面に設けたねじ部を利

図 4 工作物形状

図 5 切刃形状

用してバイトシャंक尾部を結合、固定することにした。ここでバイトシャंकは振動時これに生じる相隣れる振動節部を利用して 2 個のバイト押え金具(4)を利用してバイトホルダ(5)に固定した。そして、このバイトホルダが水平になるようにして工具振動系を旋盤の横送りテーブル(6)上に固定したのが図 3 (b) に示す二次元振動切削装置である。工作物固定ホルダ(8)を旋盤の縦送りテーブルガイド上に取付け固定する。切込みは横送りテーブルを利用して与えることにし、切削送りは縦送りテーブルを利用することにした。工作物変位の測定のために種々予備テストを行ったところ、本来旋盤に備わっている駆動源を利用した旋盤の縦送り機構を利用すると、主軸台などの歯車列に起因する機械振動が外乱となって、肝心の切削時の工作物の振動変位が正確に測定できないため別途に無段変速機付きモータを駆動源として設けて、これの回転を利用して直接旋盤の送り軸に伝達して外乱振動の

表 1 実験条件

Cutting speed v	20~500 mm/min
Depth of cut t	0.01~0.25 mm
Amplitude a	15 μ m
Frequency f	20 kHz
Cutting tool	Carbide k10
Work material	Carbon steel, Stainless steel, Brass, Aluminum alloy
Cutting oil	Machine oil + Spindle oil

$V=80$ mm/min, $t=0.1$ mm, $a=15$ μ m,
 $f=20$ kHz, S 45 C

図 6 変位測定用工作物の切削性能

少ない切削送りが与えられるようにした。また、同じ理由から工作物変位測定用センサを、旋盤本体から隔離して別途に設けた防振台上に固定することにした。これらの対策により外乱の少ない変位波形が測定される。図 4 に変位測定用測定子としての工作物の詳細形状を示す。幅 2 mm、長さ 20 mm を振動平削りすることにする。図 5 にバイト先端切刃形状を示す。バイトチップは超硬 K 10 を使用し、先端切刃直線部を 3 mm とした。切削条件を表 1 に示す。本報では工具の振動数、振幅を 20 kHz、15 μ m と一定にし、切込み、切削速度をそれぞれ $t=0.01\sim0.25$ mm、 $v=20\sim500$ mm/min と変化させ、工作物として炭素鋼、ステンレス鋼、アルミニウム合金、黄銅を用い、種々切削実験を行うことにした。本報の狙いは通常の振動切削効果が発揮される状況において非線形振動現象を観察することにあるので、図示形状の比較的曲げ剛性の低い工作物を利用することで振動切削の効果が損なわれるようでは実験の意味をなさない。このために本実験を行う前に、これと同じ条件にて切削テストを行い加工面性状、切りくず形状、切削比等について観察することにした。この結果ステンレス鋼と炭素鋼においては切込み量を大きくするに従って加工面にむしれがみられ

る傾向を示すが、普通切削に比較して大幅に表面粗さを向上させることが確認できた。図 6 に炭素鋼における加工例を示す。図 6 のように普通切削による $R_{\max}$ 5 μ m の表面粗さが振動切削によって $R_{\max}$ 1 μ m に向上する。また、切削比は普通切削時の 0.35 が 0.68 に向上する。この加工例のように本実験における加工条件の範囲において大局的に振動切削の効果が発揮され、実験で使用する工作物が変位測定用測定子として利用できることがわかった。

4. 実験結果および考察

4.1 切込み、切削速度を変化させたときの工作物変位波形とポアンカレ写像 炭素鋼材を用い切込み量を変化させた時の工作物変位波形を図 7 (a) に示し、各切込み条件の中で $t=0.03$ mm, 0.05 mm, 0.1 mm, 0.2 mm の変位波形に対応するポアンカレマップを図 7 (b) に示す。工作物長さ 20 mm を切削する間に切削現象が変化するため、図示の変位波形はそれぞれの切込みに対し、切刃が切削開始位置から約 10~15 mm の位置に達したときの現象を捉えたものである。以下両図を対応させながら考察することにする。

切込み量の少ない $t=0.01$ mm, 0.03 mm では工具の振動周期 $T=50$ μ s の 2 倍、2.5 倍の周期をもち振幅 0.8~2.2 μ m の変位波形が現れる。 $t=0.01$ mm ではビート状の 1/2 分数調波振動を示し、 $t=0.03$ mm では振動波形の各々の山の高さが不ぞろいとなる振動波形を示す。両図の振動波形はそれぞれの切込みにおける特有の現象ではなく、工作物 20 mm を切削する間において両条件によって観察される現象の一つである。この $t=0.03$ mm におけるポアンカレマップは (x , $\dot{x}$) 平面の座標原点を中心に x 軸方向に振れ動き、右上がり、左下がりの点列を描く。 $t=0.05$ mm では工具の振動数に対応した振幅の小さい 20 kHz の振動変位波形を示し、これをポアンカレマップ上で観察すると一点に集中する点列を示し安定したリミットサイクル軌道を描いている。図 7 の写真では画面上同一点付近において何度もストロボ撮影されるため白く塗りつぶされている。 $t=0.1$ mm では 20 kHz の振動波形に 3 倍周期を主体とする振動波形が重ね合された分数調波振動波形を示し、これをポアンカレマップ上で観察すると $t=0.05$ mm でみられたように原点付近の一点に集中する現象に加え、ループ状点列による概周期振動がみられる。何度か同一条件で実験したところ、この現象は工作物形状の変化や工具の摩耗などのわずかな状況の変化によって発生するものであり切削中僅かに

加工音を伴う。切込みを大きくして $t=0.15\sim0.25$ mm とすると工具の振動周期と同じ $T=50\ \mu\text{s}$ の周期をもち波形の山の先端を鋭くした規則的な振動現象が観測される。

このように切込みを大きくして加工負荷を増加させることで振動波形の規則性が顕著となるが特に本実験範囲において切削抵抗の増加による振幅の増加現象はみられない。中でも $t=0.2$ mm における変位波形は他と比較して大きな振幅を示すが安定した振動状態にあるといえる。したがっておよそポアンカレマップ上の点列は少し散らばりを示すが $t=0.05$ mm でみられ

た点列のごとく一点に集中した点列が主体的となる。図 7 に示す $t=0.2$ mm におけるポアンカレマップは $1/3$ 分数調波振動に変化したときの波形をとらえている。

図 8 には炭素鋼材を用い切込み量を $t=0.1$ mm と一定とし、切削速度を $v=20\sim500$ mm/min と変化させたときのポアンカレマップを示す。図 8 より特に切削速度の低い $v=20\sim40$ mm/min では位相面の第 1～第 2 象限にまたがるループ径の小さい概周期振動の点列を描く。したがって、これに図 7 の結果を考慮すると $v=80$ mm 以下で概周期振動が得られること

(a) 工作物変位波形

(b) $(x, \dot{x})$ ポアンカレ画像による点列

図 7 切込みを変化させたときの工作物変位波形とポアンカレ画像

図 8 切削速度を変化させたときのポアンカレ画像

を示す。切削速度を $v=100$ mm/min 以上とすると 20 kHz の振動成分を増加させて図 8 はポアンカレマップ上点列が徐々に原点付近のアトラクタに吸引されて一点に集まるようすを示す。このように本実

験で行った切削速度範囲において特に $v=80$ mm/min 以下の切削速度の低い領域では概周期振動がみられるが、 $v=100$ mm/min 以上の切削速度範囲では一点に集中するリミットサイクルによる点列が主体的になってくる。

4.2 ポアンカレ写像による加工面性状の評価

4.1 節までは各切削条件における切削長さ 20 mm を切削する間の一現象をとらえて考察を進めてきたが、実際には切削を開始してから終了するまでの 1 ストローク切削の間、振動現象の変化、成長に加えて切刃切削位置の変化に伴って工作物振動系におけるパラメータが変化してポアンカレマップ上多様な点列が現れる。これら一連の変化現象は本実験条件範囲で特に低切込み、低切削速度領域において顕著であり、この時のポアンカレマップ上の点列とこれに対応する加工面の性状を観察し切削性の評価を行うことは非常に関心がもたれる。

図 9 に切込み量 $t=0.05$ mm, 切削速度 $v=80$ mm/min で炭素鋼材を振動切削したときの切削長さ 20 mm の加工表面プロフィールと切削点 A~E 各位置におけるポアンカレマップ、加工表面の顕微鏡写真を示す。図示の加工表面性状は切削時の工作物の挙動を物語ることは論じるまでもない。そこで、まず切削時変化するポアンカレマップ上の点列を観察することにする。切削開始位置から 5 mm の A 点における点列は広範囲に散らばりを示すが、徐々に x 軸方向に振れ動くアトラクタに吸引されて図示の点列を描く。9 mm の B 点では、A 点での点列が広がりを見せて 1/5 分数調波振動と思われる 5 箇所集まる点群が描かれる。これより約 1.5 秒後の C 点では連続したループ状の点列を描く概周期振動が現れる。そして、その後の時間の経過に従って分岐現象を起こして瞬時ループを小さくして D 点に示すような一点に集中した点列を示す。前述の図 7 (b) に示した $t=0.05$ mm における写像はこの切削位置における現象をとらえている。加工終了直前の E 点においては A 点で得られた点列と類似の点列を示す。このように分岐現象を起こして概周期振動に至る変化過程は非線形現象におけるカオス状態への変遷過程⁽⁶⁾としてとらえられるが本実験ではポアンカレマップ上にストレンジアトラクタを確認するまでには至っていない。このことは切削時の切刃の進行に伴い工作物振動系におけるパラメータが変化するためにカオス成長までの設定条件が維持されないことによるものと考えられる。

次にこれら点列形状と加工面を対応させてみる。A 点から C 点での各点における表面粗さは $R_{\max} 0.5$

図 9 ポアンカレ写像と加工表面性状

図 10 各種工作物材質におけるポアンカレ写像と加工表面性状

μm を示しその値からは点列形状による違いがみられないが、 B 点の分数調波振動においては外観上約 $15 \mu\text{m}$ ピッチで面性状が変化しようすが観察される。図 9 の顕微鏡写真はその加工表面の微少部分を示す。一方小軌道を有するリミットサイクルを描く D 点での加工面は写真で観察されるようにさらに平滑な面を呈する。低速切削においては工作物の振動変位に対して工具の振動 1 サイクル当たりの工作物の送り量が極めて小さくなるため工具逃げ面と工作物との干渉が生じやすくなる。したがって振動工具前進位置の切削開始点付近をストロボタイミングとして得られる点列は工作物の振動速度を零とする x 軸上でおおよそ工具逃げ面と工作物の干渉を少なくすることを示す。前記の結果はおおよそこれに合致する。

ここで、図 9 に示す加工表面プロフィールを観察して、切削時の工作物の挙動について考察する。すなわち、図示の加工表面プロフィールから微小凹凸の表面粗さ成分を除いた滑らかな表面の起伏は切込み方向に

不動とする振動バイト刃先点に対し動的に変化する工作物の平均位置を示すことになる。図に示すように平均位置に変化がみられるような切削領域を (I), (II), (III), (IV) とすると各切削領域におけるポアンカレ写像における点列形状の変化とよく対応づけられるのがわかる。このことは今後さらに究明する予定であるがこのポアンカレ写像が振動切削による加工表面の評価方法として利用可能なことを示している。

4.3 各種工作物におけるポアンカレ写像と加工面性状

図 10 に切込み量 $t=0.1 \text{ mm}$, 切削速度 $v=80 \text{ mm/min}$ とし、アルミニウム合金、黄銅、ステンレス鋼を振動切削したときのポアンカレマップと加工物表面の顕微鏡写真を示す。図 10(a), (b) の黄銅、アルミニウム合金においては炭素鋼材の場合に比較して大きな振動変位を示し状況により切削音を伴う。図 10(a) のポアンカレマップでは四方方向に分散し、時間の経過とともに原点付近に吸引される点列を示し、同時にオシロスコープの輝度調整の理由からリミットサイクルの軌跡も撮影記録されている。顕微鏡写真はこの過程における切削現象を示し $R_{\text{max}} 3 \mu\text{m}$ の表面粗さとなっている。図 10(b) のアルミニウム合金においては $1/2$ 分数調波振動が現れ、加工表面粗さは $R_{\text{max}} 1.0 \mu\text{m}$ を示す。図 10(c) のステンレス鋼においては概周期振動が変化したと思われる、原点付近を中心とした点列の広がりが見られ、この時の加工面の表面粗さはおおよそ $R_{\text{max}} 2 \sim 4 \mu\text{m}$ を示す。

以上のように各種材料を用いた振動切削実験からポアンカレマップの点列形状と加工面性状とは系統的によく対応し、しかも、それらの点列形状とその変遷形態は炭素鋼材の場合に類似することが観測された。

5. 結 言

本報では振動切削における非線形振動現象を扱うために、低速二次元振動切削装置と工作物変位-速度測定システムを製作して、切削時の工作物の挙動と加工表面の状態をポアンカレ写像によって観察、評価した。以下に本実験で得られた主なる成果を示す。

(1) 切削速度と切込み量を変化させた実験において分数調波振動、概周期振動、分岐現象およびリミットサイクルの非線形現象の生起することを確認した。

(2) (1) の結果において工作物切削長さ 20 mm を切削する間のポアンカレマップ上の点列はおおよそ分数調波振動から分岐現象を起こして概周期振動に変化し、さらに分岐現象を起こして一点に集中する点列を描く。このときの加工表面を観察するとこれら点列形状と系統的に対応した性状を示し、ポアンカレ写像

を加工面の評価方法として利用できることがわかった。

今後さらに研究を継続して実用切削速度域における非線形現象の確認と機構の解析を進める予定でいる。なお、実験を進めるに当たりご協力いただいた宇都宮大学大学院生の吉田勝俊氏に深くお礼申し上げる。

文 献

- (1) 隈部, 振動切削, (1979), 61, 実教出版.
- (2) 例えば, 早乙女・ほか2名, 精密機械, 48-10 (1982), 1336.
- (3) 隈部・平井・早乙女, 精密工学会誌, 53-11 (1987), 1752.
- (4) 佐藤・ほか4名, 機論, 57-541, C (1991), 2819.
- (5) 隈部・谷口, 精密機械, 36-8 (1970), 532.
- (6) Berge, P., Pomea, Y. and Vidal, Ch., カオスの中の秩序, (1992), 145, 産業図書.