

二自由度系による旋削時自励振動の解析

Two-Dimensional Analysis of Self-Excited Vibration in Turning

金子 亨*・佐藤 壽芳*・谷 泰弘*・大堀 真敬*

Tohru KANEKO, Hisayoshi SATO, Yasuhiro TANI and Masanori OHHORI

記 号

- D : 被削材直径 [mm]
 F_x : 切削力の背分力 [N]
 F_y : 切削力の主分力 [N]
 K_x : 切削面積から背分力を与える比例定数 [N/m²]
 K_y : 切削面積から主分力を与える比例定数 [N/m²]
 T : 切削速度に逆比例する動的抵抗力 [N]
 c : 被削材の等価粘性減衰係数 [Ns/m]
 d : 被削材半径方向切込み [mm]
 f : 送り [mm/rev]
 k : 被削材の等価ばね定数 [N/m]
 m : 被削材の等価質量 [kg]
 q : 切削面積 [mm²]
 s : 横切刃に平行な平均切削幅 [mm]
 t : 時間 [s]
 v : 切削速度 [m/s]
 w : 横切刃に垂直方向の切込み [mm]
 x : 被削材の水平方向変位 [mm]
 y : 被削材の垂直方向変位 [mm]
 Ω : 主軸回転数 [rpm]
 α : 切削抵抗力を求める比例定数 [N]
 θ : 工具横切刃角 [deg]

1. ま え が き

切削加工の際に生じる自励振動については、工作機械の性能として発振限界を明らかにすること、振動が発生せず安定に加工しうる条件を明らかにすること、振動防止と安定に加工しうる条件の範囲の拡大についての方策を明らかにすること等を目的として数多くの研究がなされている。特に、Hahn,¹⁾ Tobias,²⁾ Tlustý,³⁾ Merritt⁴⁾らにより、自励振動の発生における再生効果の役割が認識され、それぞれ独自の手法に基づいた安定限界線図が描かれている。

* 東京大学生産技術研究所 第2部

自励振動に関する現象には、発振限界のほかに、発振後における有限振幅の振動の持続、被削面に残される振動痕等がある。これらのうち、被削面に振動痕を残す振動の持続状態についての検討は、加工の観点からして積極的に劣悪となっている状態の議論であり無意味と考えられ、必ずしもその必要性が認められなかった。しかし、一つには振動現象全体像の把握、これに基づく効果的な防振対策確立への期待等振動論からの関心から、いま一つには、粗加工において自励振動が発生する場合、加工続行の許容振幅限度を予測するという実用面の関心から、発振後の挙動に注目した研究も進められるに至った。^{5)~7)} またこれと関連して、被削面に残された振動痕の性質についても、その観察や特性の解析が行われている。^{8)~10)} この結果、自励振動の振幅が成長すると、1回転前の振動のみならず、2回転以上前の振動の影響が出る多重再生効果の現象が生じ、有限振幅の持続と被削面上に残される振動痕の生成に密接な関連を有していることが示された。⁵⁾

著者らはこの多重再生効果の存在を指摘し、その役割を1自由度系について確認してきた。本報告では、旋盤による外周切削時に被削材に生ずる自励振動について、発振後の挙動を実験的に観察する一方、これを2自由度の系に多重再生効果を考慮した系としてより現実に近い形で解析を試みている。この際、1自由度系の解析で低切削速度で安定域を拡大する効果をもたらした、切削速度に反比例する動的抵抗力の役割についても検討している。

2. 自励振動時における被削材の挙動

図1は、被削材の運動を測定器との間の相対変位として鉛直方向、水平方向について測定し、同時に切削力を主分力、背分力として測定する系の概念図である。図2、図3は三爪スクロールチャックで片持ちの保持をした被削材に自励振動が発生している状態をこの装置で測定した結果である。縦軸、横軸をそれぞれ垂直方向変位と水平方向変位あるいは主分力と背分力にとっている。ここで、水平方向変位は、被削材が工具から離れる方向を正

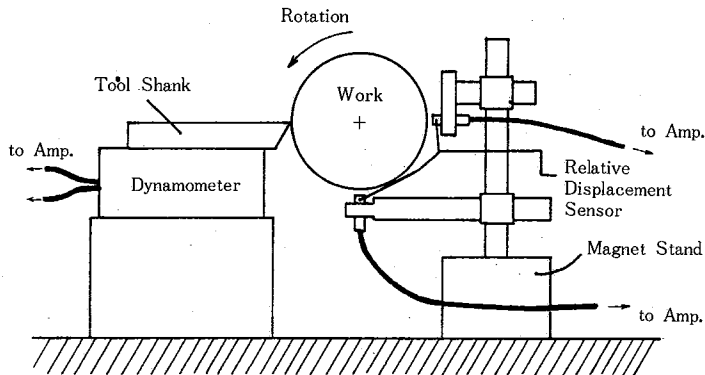


図1 旋削時自励振動測定システムの概念図

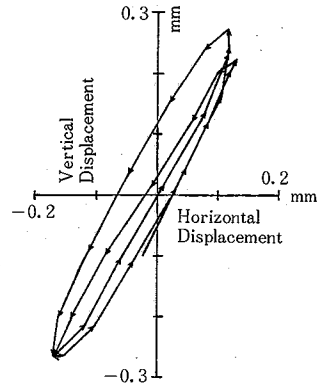


図2 被削材の振動時挙動

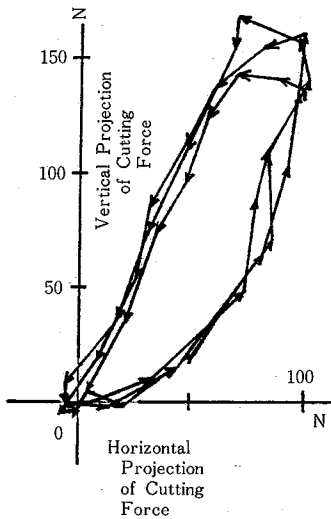


図3 切削力の振動時特性

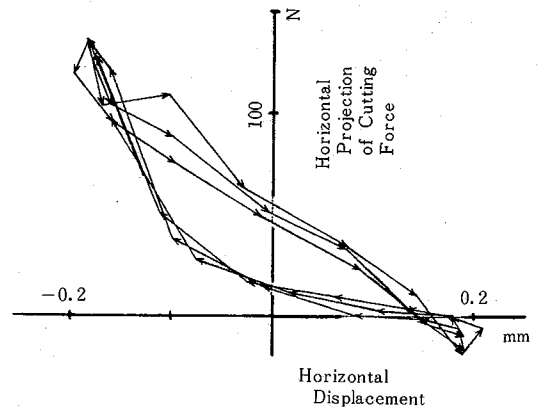


図4 背分力と同方向変位の特性

としている。また図4は水平方向変位を横軸に、背分力を縦軸にとった場合の挙動である。被削材の振動の特徴として、これらの結果から、次の諸点があげられる。

1) 被削材の変位、切削力共に右に傾いた左回りのループを描いている。すなわち、鉛直方向成分は、水平方向成分に対し、やや位相が遅れている。

2) 切削力が零になる時点がある。すなわち振幅が成長すると、工具と被削材が離れる時間域が生じる。これは多重再生効果の現象が生じていることを意味している。

5)

3) 水平方向変位と背分力の関係は、左に傾いた右回りのループを描いている。これは、工具と被削材の相対変位が増加する時間領域、すなわち被削材が工具から離れる時間領域の方が、被削材が工具に食い込んでいく時間領域よりも切削力が大きく、この間に振動エネルギーが供給され、振動が自励的に持続することを意味している。

垂直方向変位と主分力についても同様の関係が示される。

これらの諸点は、Doiら¹¹⁾によって示された性質と一致しているが、本論文に扱う解析結果と比較すべき性質として特徴を確認したものである。

3. 2自由度振動系による解析

自励振動発振後の挙動を支配する多重再生効果の役割を明らかにするために、既報⁵⁾では1自由度振動系による解析が進められた。その解析では、多重再生効果の導入によって、発振後の振幅が有限になることが確かめられたが、被削材や切削力を含めた発振後の挙動が2自由度系として図2等のような挙動を示すことについては触れられていなかった。

本研究では、上記の点を確認するために、図5に示す2自由度振動系を用いて解析を試みた。この系の運動方程式は、

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F_x \quad (1)$$

$$m\ddot{y} + c\dot{y} + ky = F_y \quad (2)$$

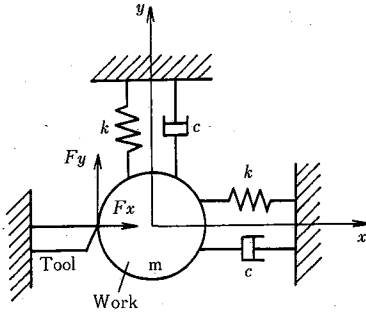


図5 2自由度系の振動モデル

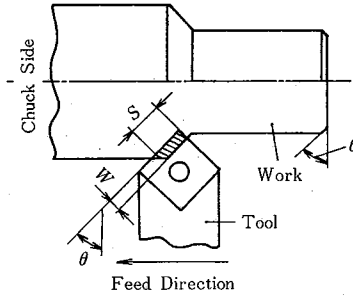


図6 切削状態の概念図

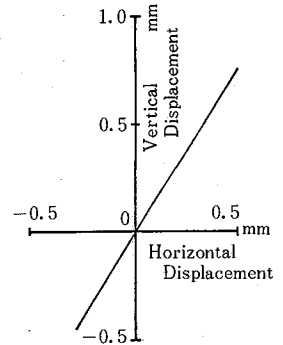


図7 解析による被削材の振動時挙動(切削速度に逆比例動的抵抗なし)

とかける。 x, y は静止状態における被削材の重心の位置を零とし、 x は被削材が工具から離れる方向を正、 y は鉛直上方向を正とした。また簡単のために、2方向の減衰係数、ばね定数は等しいとしている。

まず、 F_x, F_y をいずれも q に比例し、

$$F_x = K_x \cdot q \quad (3)$$

$$F_y = K_y \cdot q \quad (4)$$

と与えられるものとした。 q は図6に示す工具形状から被削材の1回転前、2回転前の水平変位を考慮して以下のように算出される。ここで工具のノーズ半径は零としている。

$$q = ws \quad (5)$$

ただし

$$w = Qft \cos \theta / 60 - x(t) \sin \theta \quad (6)$$

$$: 0 \leq t < 60/Q$$

$$w = f \cos \theta + \min \{ x(t - 60/Q) \sin \theta, \\ f \cos \theta + x(t - 120/Q) \sin \theta, \dots, \\ (n-1)f \cos \theta + x(t - 60n/Q) \sin \theta \} \\ - x(t) \sin \theta : 60/Q \leq t \quad (7)$$

$$s = (d - x(t)) / \cos \theta - w \tan \theta / 2 \quad (8)$$

式(6)、式(7)は、それぞれ切削開始から被削材が1回転するまでの間、1回転以上の回転に対しての時間領域に対応している。なお被削材の端面は、工具横切れ刃角 θ と同じ角で面取りがされているものとし、1回転目の切削から定常状態と同じ切込みになるようにしている。工具と被削材が離れる場合には w は負となるが、計算では零と置き換えている。また上記の関係は、 $f < d$ に対して成り立ち、ねじ切りのようにこの条件が満たされない場合は対象としていない。

図7、図8は式(1)、式(2)を Runge-Kutta-Gill の方法により解き、時刻歴として自励振動が発生することを確認した後、図2、図4に対応して変位同士の関係、変位と切削力との関係を示したものである。計算機には HITAC M-200 H を用いた。まず図8に示された特性は、左に傾き時計方向のループを描いている点で図4と

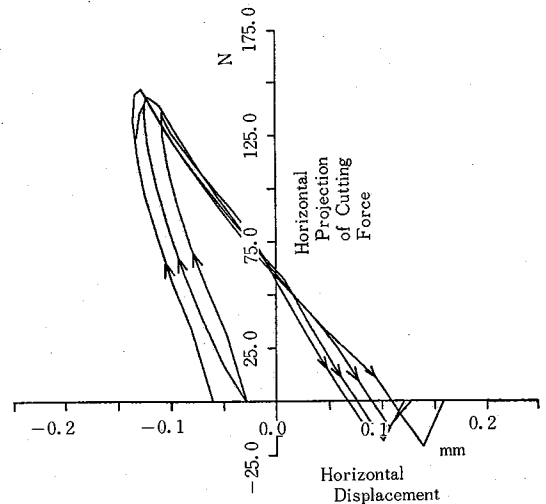


図8 解析による背分力と同方向変位の特性

共通点が見られる。一方図7を図2と比較すると、図形の傾きには同様な傾向が見られるが、計算結果はループを描かず測定結果とは異なっている。このことは、これまでに述べた解析の過程では、動的な切削力が考慮されていないことを意味している。

既報⁹⁾では、振動状態では工具と被削材の相対運動を妨げる抵抗力が背分力方向に働くことを実験的に確かめて運動方程式に導入し、低速切削で安定に切削できる領域が拡大することを説明できており、以下でもこの抵抗力を考慮した解析を試みる。この抵抗力には

- 1) 切削速度に反比例する
- 2) 工具と被削材の背分力方向の相対速度に比例する
- 3) 切削面積には依存しない

なる基本的な性質があるから、式(3)を以下のように変形して用いることとした。

$$F_x = K_{xq} - T \quad (9)$$

研 究 速 報

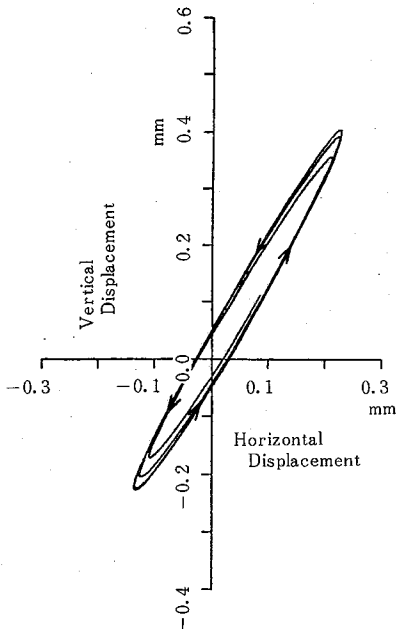


図9 解析による被削材の振動時挙動(切削速度に逆比例する動的抵抗力を考慮)

ここで,

$$T = ax(t)/v \quad (10)$$

$$v = \pi D \Omega / 60 - \dot{y}(t) \quad (11)$$

図9は解析の結果を図2, 図7に対応して軸心の運動軌跡を描いたものであるが, 図7で見られた実測と一致しない性質は改善され, 反時計まわりのループが描かれ, 図2とよく一致する特性となっている。以上の解析から,

上記動的抵抗力の導入によって, 旋削時に発生する自励振動挙動の一つが, 新たに説明できることを示した。

4. ま と め

旋盤を用いたチャック支持, 片持ちの外周切削で, 振動が持続している状態においてその挙動を調べることににより, 変位, 切削力ともに主分力方向の成分が背分力方向の成分に対しやや位相遅れが生じていること, 被削材が工具から離れつつある状態の切削力の方が, 接近しつつある状態の切削力よりも大であり, この間に振動エネルギーが供給される運動となっていることを確認した。また被削材を2自由度の振動系とし, 多重再生効果, 切削速度に逆比例し工具と被削材の相対運動速度に比例する動的抵抗力を導入して時刻歴の解を求めることにより, 以上に確認した発振後の被削材の挙動をよく説明できることを明らかにした。

(1983年9月20日受理)

参 考 文 献

- 1) R. S. Hahn: Trans. ASME, 75, 1953-8, 1073
- 2) S. A. Tobias and W. Fishwick: Trans. ASME, 80-5, 1958-7, 1079
- 3) J. Tlustý: Proc. 6th MTDR, 1965, 5
- 4) H. E. Merritt: Trans. ASME, 87-4, 1965-11, 447
- 5) 近藤ほか2名: 機論 46-409, 昭55-9, 1024
- 6) J. S. Sexton and B. J. Stone: J. Mech. Eng. Sci., 22-3, 1980, 107
- 7) J. Tlustý and F. Ismail: Annals CIRP, 30-1, 1981, 299
- 8) 内田ほか2名: 機論 46-407, 昭55-7, 771
- 9) 佐藤, 大堀: 機論 48-426, 昭57-2, 188
- 10) T. P. Tai et al: Proc. 20th MTDR, 1980, 449
- 11) S. Doi and S. Kato: Trans. ASME, 78, 1956-7, 1127