機械構造の非線形性を考慮した自励びり振動の

シミュレーション解析(第3報)*

—旋削びりにおける有限振幅不安定性の解析—

溝口 洋右** 松村 隆*** 白井 英治†

Simulation Analysis of Self-Excited Chatter Vibration

with Taking the Non-Linearity of Machine-Tool Structure into Account (3rd Report)

— Analysis of Chatter Caused by Finite Amplitude Instability in Turning with Regular Engine Lathe —

Yousuke MIZOGUCHI, Takashi MATSUMURA and Eiji USUI

The simulation analysis of non-linear chatter onset process developed in the previous reports is further extended to chatter vibration caused by the finite amplitude instability. The instability is induced with a step of undeformed chip thickness placed at the start point of turning. The chatter onset process and the lowered stability threshold predicted by the simulation analysis are in good agreement with the experimental results. The amplitude-depth of cut stability chart which involves the finite amplitude instability is obtained through the analysis, and the apparent difference between chatter arising and disappearing depth of cut is discussed. The respective role of non-linearity in machine structure and dynamic cutting force is also discussed for non-linear chatter generation, and for quantitative prediction it is stressed that both the non-linearities are indispensable.

Key words: non-linear chatter vibration, finite amplitude instability, computer simulation of chatter onset, stability chart, non-linearities of machine structure, non-linearities of dynamic cutting force, regular engine lathe

1. ま え が き

前報¹⁾では、寸法、剛性、精度劣化程度、工作物支持方法が異なる2台の普通旋盤を対象とし、インパルス応答法で求めた振動定数の切削力による非線形変化と著者らの動的切削力の非線形解析方法^{2), 3)}を併用してびり発振過程のシミュレーション解析を行えば、実測値とよく一致するびり安定限界が予測できることを示した。また線形びり理論では説明できない定振幅持続びり、びりの高送り安定性、高速安定性についても実測結果と一致する定量的予測が可能であることを明らかにした。

本報告は、前報と同じ解析手法を用い、非線形振動に特有なジャンプ現象として従来指摘されているびり振動の有限振幅不安定性^{4), 5)}や振幅一切込み安定限界線図が定量的に予測できることを示すとともに、非線形びりにおける構造非線形性と切削力非線形性の効果の相違についても若干の検討を行ったものである。

2. 切削工具の衝撃喰いつき効果

例えば丸棒表面にキー溝や突起があって断続旋削が行われる場合、あるいは前加工面に過大なびり痕が残っている場合にはびりが発生しやすいことはよく知られた経験事実である。すなわち静的旋削では安定でも、外乱によってある程度の振幅の振動が与えられると、それによってびり振動が誘発されるわけであり、有限振幅不安定性(finite amplitude instability)^{4), 5)}と呼ばれている。

この不安定性を解析の容易な状況で実現させるため、切削工具を以下の方法で衝撃的に工作物に喰いつかせ、過渡振動を

振動系に与えることにした。図1は前報に述べた旋盤Bでの工具、工作物の配置であり、工作物はチャック支持で心押し台を用いていない。親ねじ送りで定常切削状態を得た後、せん断ピンを用いた急停止装置⁶⁾で工具を高速で逃がすと主切れ刃に垂直な断面内で図2(a)の形の半生成切りくずが得られる。そこで往復台を引き戻して工具を再設定し、再度同じ位置から親ねじ送りを与えると、急停止位置から工作物1回転前で同図(b)のように余分な切りくずが除去され、急停止位置では同図(c)のように送り値に対応する切削厚さでいきなり切削が開始されることになる。以後、この切削開始状態をステップ入力の場合と呼ぶ。なお、これに対応する衝撃のない切削開始は工作物端に主切れ刃の傾きと同じテーパ部があって送りを与えられる場合であり、切削厚さ

Fig.1 Experimental set-up

Fig.2 Procedure to make the step for impact test

* 原稿受付 平成14年4月2日

** 学生会員 東京電機大学大学院(現、日本精工(株); 前橋市総社町1-8-1)

*** 正会員 東京電機大学(東京都千代田区神田錦町2-2)

† 名誉会員 東京電機大学

(a) Step input

(b) Slope input

Fig.3 Simulation results of chatter onset showing effects of finite amplitude instability

Cutting conditions : material cut, S45C steel (normalized); tool, P30 carbide (0,0,7,7,45,45,0.1); cutting speed, 125 m/min; feed rate, 0.18 mm/rev; depth of cut, 0.9 mm; workpiece diameter, 105 mm; cutting fluid, dry.

は零から連続的に増し、工作物の1回転後に同図(c)と同じ切削厚さになるので、以後これをスロープ入力の場合と呼ぶ。

ステップ入力での発振過程を求めるには、切れ刃喰いつきの初めから図2(c)のような動的切削模型²⁾を構成し、切削の進行に応じたその変化から動的切削力を求め、前報と同様に非線形振動方程式を数値解析していけばよい。ただし、喰いつき時には工作物に設けた段差部表面、工具すくい面には酸化物などの汚染があり、すくい面の摩擦状態は連続切削中のそれと著しく異なる。このため動的切削模型の構成に必要な摩擦の応力特性式²⁾ $\tau_t = \tau_s (1 - e^{-\lambda \sigma_t / \tau_s})$ の特性定数 λ の値は喰いつき時に定常切削時より小となる。ただし、 τ_t 、 σ_t はそれぞれすくい面の摩擦応力、垂直応力、 τ_s は2次元定常切削のせん断面せん断応力である。びり振のない切削条件でステップ入力の実験を行えば、喰いつき時、定常切削時の特性定数 λ_0 、 λ_c の値、 λ_c に到達するまでの切削距離 s_c は求められるから、 $\lambda = \lambda_0 + (\lambda_c - \lambda_0)(1 - e^{-cs})$ とし、定数 c を動的切削模型変化から求めた過渡切削力が実測値とほぼ一致するように定めて使用した。

図3は発振過程の数値解析結果の例であり、 F_H は変動切削力の主成分、 x_H は切削速度方向の振動変位を示している。用いた振動定数変化は前報の旋盤Bのものであり、2次元定常切削データも前報のものである。同図(a)のステップ入力では定振幅持続びりが発生するのに対し、同じ切削条件の同図(b)のスロープ入力では全くびりが生じておらず、有限振幅不安定性が存在するのがわかる。図4は図3の解析結果に対応する実験

(a) Step input

(b) Slope input

Fig.4 Experimental results of chatter onset showing effects of finite amplitude instability

Cutting conditions are same as in Fig.3.

(a) Simulation result

(b) Experimental result

Fig.5 Comparison between simulated and experimental results in chatter onset process with small step input

Cutting conditions are same as in Fig.3 except depth of cut is 0.8 mm and feed rate is 0.14 mm/rev.

結果であり、本研究のシミュレーション解析法で有限振幅不安定性についても十分良好な予測が可能であることを示している。なお、図3, 4の切込み0.9 mmはスロープ入力でのびり安定限界より小であり、切込みを増して安定限界に近づければ後述の図12(a)のようにステップ入力でも更に大振幅の定振幅持続びりが得られる。図5はこれと逆な例であり、安定限界よりかなり小な

Fig.6 Reduction of limit depth of cut for chatter stability with finite amplitude instability

Cutting conditions are same as in Fig.3 except cutting speed and feed rate are variable.

切込みを用い、送りを下げてステップ入力を減じた場合である。ステップ入力で発振が始まりそうになるが、減衰してしまうのがわかる。図6はステップ入力とスロープ入力のびり安定限界を比較したものであり、衝撃があれば有限振幅不安定性によって安定限界が低下すること、本研究の解析法でその定量的予測ができることが示されている。なおびり安定限界の判定は前報と同じく、切削開始から主軸20回転後の x_H の両振幅が $40\mu\text{m}$ 以上の場合をびり状態とした。

3. 振幅一切込み安定限界線図の作成

S.A.Tobiasら^{4),5)}は、発生したびり振動が振動中に切込みを減少させても容易には消失せず、発生時の切込みより遥かに小さな切込みに到って突然消失することを実験によって示し、これを定性的に説明する非線形びり理論を展開している。この理論は機械構造の剛性(ばね定数)のみを変位の3次多項式、変動切削力を刃先切削厚さの3次多項式と仮定するものであるが、この理論の振幅一切込み安定限界線図、図7の定性的傾向は実際と一致するとされているので⁴⁾、これを念頭に本研究の解析手法での検討結果を述べる。

丸棒工作物に切削開始側が細くなるテーパを与えれば、切込みが連続的に増す旋削を行うことができる。この場合図7では横軸に沿って状態が移り、点aに到って安定限界に達すると点bまでは定振幅持続びりが生ずる。点bの切込みを超えると振幅は急激に発散して点b'の大振幅持続びりとなるが、ここから切込みを逆テーパにより連続的に減少させても振幅は急には減少せず、点cの切込みになるまでびりは消失しない。図8(a)は上記の連続的な切込み増加過程を本研究の解析法でシミュレートしたものであり、同図(b)は対応する実験結果である。図示の領

Fig.7 Amplitude - chip width stability chart for $z\Omega = 4800\text{ rev/min}$ (after N. H. Hanna & S. A. Tobias)

Fig.8 Variation of vibration with continuously increasing depth of cut Cutting conditions are same in Fig.3 except depth of cut is variable.

域①は安定域である。領域②に入るとびりが発生するが、その振幅の増加は緩慢であるから、切込みの増加を停止すれば定振幅持続びりとなる状態と考えられ、図7の点aから点bの領域に対応している。更に図8の領域③に入れば振幅は急増するので、図7の点bから点b'に対応する変化が現れるようである。実験結果には工作物の心振れによる微振動が生じているが、解析結果との良好な一致は明らかである。図9はステップ入力方式

(a) Simulation result

(b) Experimental result

Fig.9 Variation of vibration with continuously decreasing depth of cut
Cutting conditions are same as in Fig.8.

で発振させた後、切込みを連続的に減少させた場合の解析結果と実験結果である。びり振幅の減少は緩慢であり、切込みの減少停止で定振幅びりになると思われる。図7では点b'から点cに到る変化に対応するが、点c、c'間の急激な振幅減少は図9では明瞭には生じなかった。しかし同図のびりが消失する切込み約0.8 mmは前図のびり発生切込み約1.2 mmより明らかに小となっている。なお図9の解析結果と実験結果の一致は既述の工作物心振れの影響を除けば良好である。

図10はシミュレーション解析の結果から求めた振幅一切込みの安定限界線図である。ただし、図7と同様に定振幅びりに対するものであり、前報及び図6で用いた著者の安定限界とは意味が異なる。図10の曲線ab、b'cは図8、9の結果から求められ、図10の曲線b'dは点b'を得た後、その状態から更に切込みが増大する場合をシミュレートして求めた。なお、曲線abは前報に述べたスロープ入力で定振幅持続びりが生ずる場合である。同図の曲線bcは点b、cに対応する切込み間の数種の切込みで送りを変えてステップ入力での発振を調べ、減衰せずに振幅が曲線b'cに到達する臨界の衝撃振幅を求めて描いた。例えば同図の点AからA'への矢印はステップ入力で不安定域内の衝撃振幅が与えられて定振幅持続びりとなる図3(a)の場合、また点BからB'への矢印は衝撃振幅が安定域内であり、振動が減衰してしまう図5の場合である。もとより本研究のシミュレーション解析は

Fig.10 Predicted amplitude - depth of cut stability chart
from simulation analysis
Cutting conditions are same as in Fig.8.

(a) Without non-linear structure

(b) Without non-linear cutting force

Fig.11 Comparison between effects of single and double non-linearities upon limit depth of cut for chatter stability (without finite amplitude instability)

Cutting conditions are same as in Fig.3 except cutting speed and feed rate are variable.

数値解析であって振動方程式の解析解を求めるものでないから、図10は大略の安定限界であるが、図8、9に示したように実測結果と定量的に一致するものを予測できるわけである。なお今後、適当な近似で一応の解析解を得る方法を検討してみたいと考えている。

4. 構造非線形性と切削力非線形性の効果の相違

本報告のシミュレーション解析では機械構造の非線形性、すなわち切削力変動に対する機械構造の応答が非線形的で振動定数が切削力に応じて非線形変化すること、また切削力の非線形性、すなわち動的切削力は刃先切削厚さに比例せず、振動状態に応じて複雑に変化すること、の両者が同時に考慮されている。以下ではこれらの非線形性の効果がそれぞれどのように現れるか、あるいは両非線形性の同時考慮が不可欠なのかどうかにつ

いてシミュレーション解析を用いて検討する。図11はスロープ入力の場合のびり安定限界についての検討である。同図(a)は構造非線形性を無視して切削力非線形性のみを考慮した場合を両非線形性考慮の場合と比較している。構造非線形性の無視では、中間的切削条件として切削速度140 m/min, 送り0.205 mm/revをとり、この場合の静的(無振動)切削力に対する振動定数を固定して用いている。同図(b)は逆に切削力非線形性を無視して構造非線形性のみを考慮した場合の同様な比較である。切削力非線形性の無視では、前記の切削条件での静的比切削抵抗を固定して用い、切削力は刃先切削厚さに比例するとしている。同図(a)よりびりの高送り安定性は構造非線形性を無視すると著しく減少するのがわかる。一方、同図(b)では切削力の非線形性を無視しても高送り安定性は大きく生じているから、構造非線形性が高送り安定性の支配的要因であることが確かめられる。送りを上げれば機械構造への予荷重が増し、ばね定数や履歴減衰係数が増大することが重要であると言える。なお、同図(a)で切削力の非線形性のみでも若干の高送り安定性が生ずるのは、送りによって用いた2次元切削データが変わり、動的切削模型の変動の状況、動的切削力が変わるためである。これに対しびりの高速安定性は切削力非線形性のみで同図(a)のように両非線形性考慮の場合と変わりなく生じ、切削力非線形性を無視すれば同図(b)のように高速安定性はほとんど生じなくなってしまう。従って切削力非線形性が高送り安定性の支配的要因であり、前述の2次元切削データ、動的切削模型の変動状況、動的切削力の切削速度による変化が重要であると言える。なお、同図(a), (b)に見るように、いずれか片方の非線形性を考慮した安定限界は両非線形性を考慮したものとは著しく相違している。両非線形性を考慮した同図の安定限界は前報で示したように実測とよく一致するから、両非線形性の考慮は不可欠である。

図12はステップ入力の発振過程について同様な検討を行ったものであり、図3, 4の場合よりさらにスロープ入力のびり安定限界に近い切込み1.2 mmを用いている。同図(a), (b), (c)はそれぞれ両非線形性を考慮、切削力非線形性のみ考慮、構造非線形性のみ考慮の場合である。同図(a), (c)ではともに定振幅持続びりとなり、びり振幅はほとんど同じになっているのがわかる。非線形変化の動的切削力であろうと刃先切削厚さに比例する線形変化のそれであろうと、発振振幅は図7の曲線b'c上に落ちついてしまうためである。これに対して同図(b)の構造非線形性の無視では、構造非線形性による振動振幅の抑制がないから、図7の曲線b'cより上側の安定域がなく、振幅は発散して定振幅持続びりとならないものと考えられる。

5. 結 論

- (1) 送り量に相当する切削厚さでいきなり切削を開始する方法で喰いつき衝撃を与え、有限振幅不安定性によるびり振動を発生させた。発振過程を前報の方法でシミュレーション解析するとともに、無衝撃の通常の場合からのびり安定限界の低下を求めた。得られた発振状況および安定限界の低下は実測結果とよく一致する。
- (2) 旋削中に一定速度で切込みが増加する場合のびり振動の発生、びり振幅の変化、同様に切込みが減少する場合の大振幅持続びりの振幅変化をシミュレ

Fig.12 Comparison between effects of single and double non-linearities upon chatter onset with finite amplitude instability
Cutting conditions are same as in Fig.3 except depth of cut is 1.2 mm.

ーション解析し、実測結果とよく一致する結果を得た。またこの結果から有限振幅不安定性を含む振幅一切込み安定限界線図を作成し、びり振動の消失切込みは発生切込みより著しく小となることを示した。

(3) 非線形自励びりにおける構造非線形性と切削力非線形性の効果の相違をシミュレーション解析によって検討し、喰いつき衝撃のない通常のびりでは、構造非線形が高送り安定性、切削力非線形が高速安定性の支配的要因となることを示した。また喰いつき衝撃を伴うびりでは、構造非線形がびりの大振幅発散を抑止する主要因であることを示した。

参 考 文 献

- 1) 白井英治, 木村 肇, 溝口洋右, 松村 隆: 機械構造の非線形性を考慮した自励びり振動のシミュレーション解析(第2報) —普通旋盤の多自由度連成びり振動の場合の解析, 精密工学会誌, **67**, 7 (2001) 1190.
- 2) 白井英治, 帯川利之, 笹原弘之, 白樫高洋: 自励びり振動における動的切削過程の非線形効果 (第2報) —動的切削過程のエネルギー法による解析, 精密工学会誌, **56**, 4 (1990) 661.
- 3) 白井英治, 吳進, 帯川利之: 接触面積拘束工具のびり振動抑制効果 (第1報) —発振過程の解析と振動抑制機構の検討, 精密工学会誌, **56**, 2 (1990) 329.
- 4) N. H. Hanna & S. A. Tobias: A Theory of Nonlinear Regenerative Chatter, Trans. ASME, J. Eng. Ind., **96**, 1 (1974) 247.
- 5) C. J. Hooke & S. A. Tobias: Finite Amplitude Instability — A New Type of Chatter, Proc. 4th Int. M.T.D.R. Conf. Pergamon Press (1964) 97.
- 6) 北川武揚, 白樫高洋, 白井英治: 切削工具寿命の解析的予測に関する研究 (第1報) —すくい面摩擦特性の検討, 精密機械, **42**, 12 (1976) 1178.