

被削物の取付偏心とコンプライアンスが 被削物振動に及ぼす影響

— 旋削中の被削物振動と仕上面のうねりについて (第3報) —

門脇 義次・後藤 美千男

The Effect of Eccentricity and Compliance of Chucked Workpiece on
The Turning Vibration.

—Turning Vibration of Workpiece and Undulation Remained on The
Machined Surface (3rd report)

Yoshitugu KADOWAKI, Mitio GOTO

(昭和47年10月31日受理)

1. 緒 言

前報¹⁾では、旋削物の軸直角断面形状の測定を行ない、その幾何学的円からのずれの内、周上に数個のピークを有するごく粗いピッチのいわゆるうねりに注目し、これは旋削中被削物の水平方向変位が模写されたものであることを明らかにした。このようなうねりは被削物と刃物との低サイクル相対振動によって生ずることになり、断面位置を変えても、その形状はほぼ相似となつて同じ位置にピークを生ずることから、この低サイクル振動は被削物一回転を基本周期としていることになる。

本報告は、静的な検討²⁾に引き続き、取付偏心とチャックの爪による静的コンプライアンスの相違²⁾を考慮して、この低サイクル振動の性質を実験的に吟味したものである。

2. 切削力に起因する強制振動

切削中、刃先と被削物との相対振動において、ある周期のものは空転時においても生じており、これが一種の加振源となつて切削中にはその周期のものが増巾されることが示された³⁾。一方空転時に見られない周期の振動であっても被削物の取付偏心とチャック部分での曲げに対するコンプライアンスの相違により、切削力を加振源とする強制振動を生ずる。すなわち、

D : 実切込ミ r : 被削物の半径
D₀ : 切込ミの定常値, x, y : 被削物中心の座標,
e : 取付偏心量 θ : 回転角,

として、幾何学的に考えれば、

$$D = r + D_0 - \sqrt{(r+x)^2 + y^2}$$

ここで、x, y は取付偏心によるものとして、 $x^2 + y^2 = e^2$ であるから、

$$D = r + D_0 - \sqrt{r^2 + 2e \cos \theta + e^2}$$

となり切込ミは被削物一回転を周期として変動し、これにつれて切削力が変動するものとすれば、被削物一回転を周期とする強制振動が生じ得る。

さらに、被削物はチャックの爪に起因するコンプライアンスの相違があり²⁾

Y : 静的コンプライアンス, X : 切削力方向の被削物変位, F : φ : 位相角, Y₀ : 最大コンプライアンス,

として、三ツツメスクロールチャックにおいては、

$$Y = Y_0 \cos(3\theta + \varphi) \text{ と表わされ、したがって、} \\ X = Y \cdot F = Y_0 \cos(3\theta + \varphi)$$

この結果、切削力が一定であるとしても、被削物一回転につき、3つのピークを有する水平方向の変位を呈するはずである。

次に刃先と被削物との相対振動を一回転を基本周期として、

$$f(\theta) = A_0 + A_1 \cos(\theta + \varphi_1) + A_2 \cos(2\theta + \varphi_2) + A_3 \cos(3\theta + \varphi_3) + \dots$$

の如くフーリエ解析を行えば、第2項すなわち、 $A_1 \cos(\theta + \varphi_1)$ は取付偏心自体と、取付偏心に起因する切込ミの変動の影響として、又第4項すなわち、 $A_3 \cos(3\theta + \varphi_3)$ はチャックの爪に起因するコンプラ

イアンスの相違の影響として表われる。

3. 実験方法及び実験装置

旋削中、被削物と刃物との相対振動測定に用いた装置等は次の通りである。

旋盤,	ジャパンカズヌーブ	360 HB-X
	ベツト上の振り	360mm
	心間距離	750mm
	主動力モーター	5.2KW
	主軸回転数	50~3000rpm 無段変速
	チャック	三ツ爪スクロール, M6, マツモト。

測定装置, 振動変位の測定, 一静電容量形微小変位計, 直流増巾器, 記録—データレコーダ (4チャンネル, FM変調, DC~5 KHz), フォトコーダー (6チャンネル, 振動子 G-1 000 AF)
周波数分析—振動, 騒音分析器,

被削物の取付偏心測定—電気マイクロメーター。

旋盤回転数の校正—ストロボスコープ。モニター—二現象シンクロスコープ。

これらは次の2点を除き、ほぼ前報¹⁾と同様である。すなわち、1) 相対振動の記録分析のため、データレコーダと周波数分析装置を加えた。2) 静電容量形微小変位計の検出電極を往復台に取付け、バイトと共に縦方向に移動した。なお電極付近を図1、に示す。上図は心押台側から見たもの、下図は真上から見たものであり、電極は被削物の未加工部分に対向している。すなわち、電極はバイトと対向の位置であれば、切削点の実変位が測定出来る理想的と思われる。しかし、この部分は段付部であり、切削断面には形状誤差を生じている、切屑が接近しやすい、などの誤差原因が考えられ、切削点より、ヘッドストック側に20mm接近させたものである。一方、電極はチャックと対向する側にも面積を有しており、爪とチャック本体と対向するときとがあり、1回転につき3回の周期で静電容量は変化することになる。このため、電極を薄くして、チャックとの対向面積を充分狭く作り、爪による有意な誤差を生じないようにした。

なお電極をチャックに充分近づけて空転し、変動は被削物の取付偏心のみによることを確認した。さらに、電極対向部の形状誤差を除くため、被削物はあらかじめ注意深く研削を行なって真円度を 2μ 以内とした。

4. 実験結果とその検討

(その1)

被削物—SS 41, 直径40mm, 長さ130mm,
突出100mm,

切削条件—切削速度 30m/min, 送り 0.4mm/
rev, 切込ミ 0.5, 0.75, 1.0, 1.25,
1.5, 1.75mm,

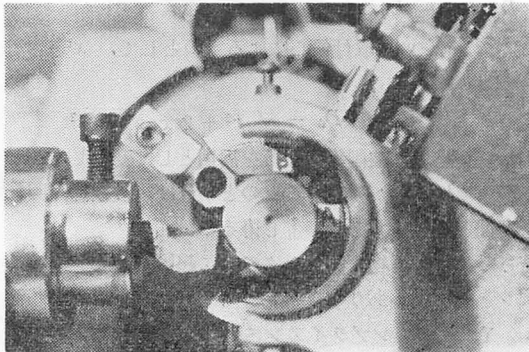
工 具—高速度鋼付刃斜剣バイト

(13°, 9°, 7°, 3°, 27°, 27°, 1.1)

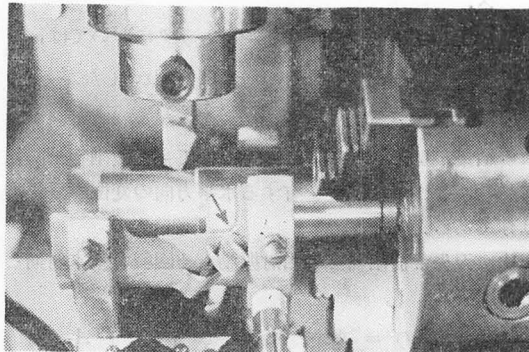
測定条件—切削序走部20mm, 電極 (チャック端より) 60mm

序走部を切削後、バイトと共に電極を移動しつつ電極と被削物との相対振動を記録し、この波形の周波数分析を行った。1例として、切込ミ1.6mmの場合を図2に示す。

空転時には、水平方向、垂直方向のいずれにも、800 Hz 及び 1 KHz の振動があり、この程度の振巾感度では、他の周波数の振動は見られない。一方、被削物の取



イ



ロ

図1 静電容量形微小変位計の電極位置

上図中 A: 水平方向変位測定電極

B: 垂直方向 "

下図中 矢印の先端に垂直方向変位測定電極の中心がある。

付偏心は、チャックの爪の一つに加工をおこなって、不ぞろいを作っているため71.7 μ である。しかし、被削物の回転は240rpmであり、これは4Hzに相当し、本記録紙上には現われていない。切削時のものは空転時には見られない100Hz以下及び、空転時に生じていた。800Hz及び1KHzのものが見られ、特に1KHzは増巾が顕著である。

ここで周波数12Hzは、被削物一回転を基本周期とする振巾の3次に相当する。しかし、突出しが比較的短か

く、チャックによるコンプライアンスの相違が明らかではなく、上記の結果に終わったものである。

次に同じ振動記録を電磁オシログラフによって波形を顕出し、数値的にフーリエ解析を行った。これにより得られた切削時の1次振巾 a と空転時の1次振巾 a_0 との比 $\eta = a/a_0$ を振巾増巾率とし、切込ミを変化させた場合の η を図3に示す。ここで a_0 は取付偏心であり、 a は取付偏心と、これによる切込ミ深さの変動による変位の和である。従って、切込ミが小さく、切削力の小さい範囲では、 a の影響が大きくなり、 η は1に近い。切込ミが増して切削力が大きくなると、切込ミの変動の影響が大きくなり $\eta > 1$ となるものと考えられる。

実際には図3に示す如く、1.3mm附近まで η は漸減しこれ以上では急増している。

（その2）

要因実験、被削物の剛性が充分小さい範囲で、取付偏心の影響と、チャックの爪によるコンプライアンスの相違の影響の程度を知るため、2⁴型要因実験をおこなった。実験条件を表1に示す。

表1 実験条件

要 因	記号	低水準 (1)	高水準 (x)
バイト形状	A	片刃バイト	斜剣バイト
切込ミ	B	0.5mm	1.0mm
締付モーメント	C	5.7kg-m	7.6kg-m
切削速度	D	10m/min	20m/min

片刃バイト, 9°, 10°, 5°, 6°, 9°, 1°, 0.6
 斜剣バイト, 13°, 9°, 7°, 3°, 27°, 27°, 1.1
 被削材 材質 (SS 41), 直径 (20mm), つかみ代 (30mm), 突出シ (100mm)

送り 0.4mm/rev,
 測定時切削点, (チャック端より 90mm),
 測定点, (" 70mm),

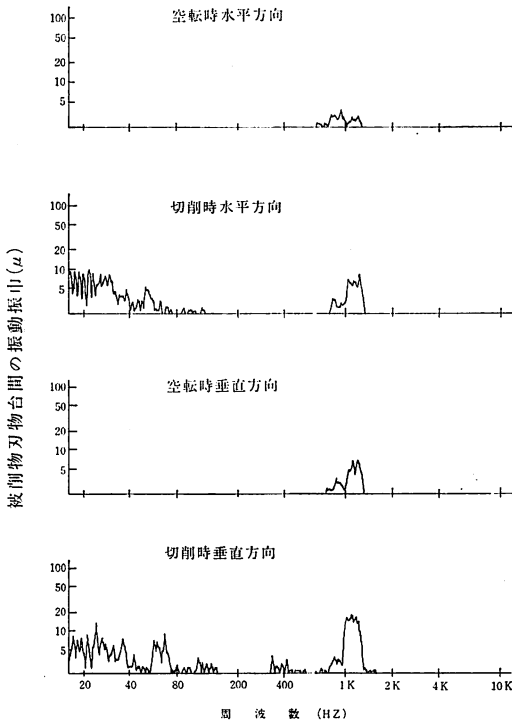


図2 変位の周波数分析結果の比較

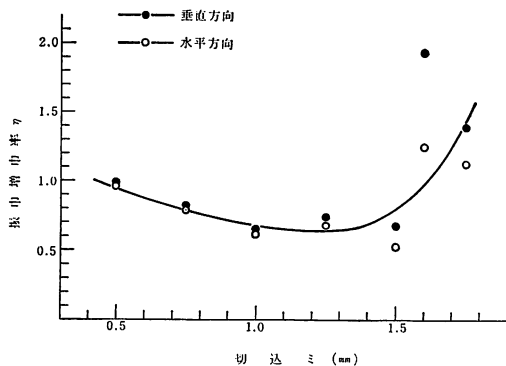


図3 切削による1次振巾の増巾率

なお各要因における水準は一般におこなわれている切削条件、作業条件等を参考にして2個を選んだものである。ここで締付モーメントは前報²⁾と同様、被削物を締付ける際にチャックハンドルに作用させるモーメントである。

各切削条件での水平方向変位を回転角を横軸として表わし、これをフーリエ解析した。

次に同一実験条件での繰り返しによる振巾の相関を検討した。これにより、実験の再現性を知ることができる。

ただし、1次に関しては、取付変心量は偶然に生ずる

表 2 YETES の方法による1次振巾増巾率 (η) の比較解析

実験条件	振 巾 比	計			算	自乗平均
		(1)	(2)	(3)	(4) = 効果	
1	1.17	8.70	3.37	19.11	37.87=計	89.6336
a	2.20	10.41	5.33	18.76	- 3.93=A	0.9653
b	2.39	8.14	3.96	1.17	6.73=B	2.8302
ab	2.94	10.62	6.45	-5.70	- 4.35=A B	1.1827
c	1.92	1.58	3.93	4.45	4.19=C	1.0973
ac	2.04	0.19	4.21	2.28	1.47=A C	0.1351
bc	3.19	-4.28	4.31	-0.53	2.25=B C	0.3164
abc	3.26	-1.42	6.31	-3.82	3.21=A B C	0.6440
d	2.21	1.96	1.03	1.71	- 0.35=D	0.0077
ad	1.72	2.49	0.55	2.48	- 7.47=A D	3.4876
bd	4.00	0.28	0.12	-1.39	- 2.17=B D	0.2943
abd	0.21	2.00	0.07	2.86	- 3.29=A B D	0.6765
cd	2.38	-0.48	-0.49	0.53	0.77=C D	0.0371
acd	1.93	-0.05	-0.79	1.72	4.25=A C D	1.1289
bcd	3.64	-3.30	-0.45	0.43	1.19=B C D	0.0885
abcd	2.67	-0.52	-0.97	2.78	2.35=A B C D	0.3452

表 3 1次振巾増巾率の分散分析表

変 動 原 因	自乗平均	自 由 度	分 散	F 値	F (95%)	F (95%)	有意水準	
主 効 果	バイト形状ミ	0.97	1	0.97	2.00	4.96	10.04	—
	切込	2.83	1	2.83	5.84	—	—	95%
	縮付モメント	1.10	1	1.10	2.27	—	—	—
交互作用	切削速度	0.01	1	0.01	0.02	—	—	—
	バイト形状と切削速度	3.49	1	3.49	7.20	—	—	95%
誤 差	4.85	10	0.845					
合 計		15						

表 4 YETES の方法による3次振巾の比較解析

実験条件	変位成分 μ	計			算	自乗平均
		(1)	(2)	(3)	(4) = 効果	
1	7.29	14.63	82.39	155.10	307.42=計	5906.6910
a	7.34	67.76	72.71	152.32	- 21.42=A	28.6760
b	10.34	7.70	105.39	18.18	213.10=B	2838.2256
ab	57.42	65.01	46.93	-39.60	- 22.42=A B	31.4160
c	4.45	17.39	47.13	110.44	- 68.14=C	290.1912
ac	3.25	88.00	-28.95	102.66	- 42.58=A C	113.3160
bc	46.38	7.44	-36.55	20.48	- 34.38=B C	73.8740
abc	18.63	39.49	- 3.05	-42.90	- 41.34=A B C	106.8122
d	8.44	0.05	53.13	- 9.68	- 2.78=D	0.4830
ad	8.95	47.08	57.31	-58.46	- 57.78=A D	208.6580
bd	62.53	- 1.20	70.61	-76.08	- 7.78=B D	3.7830
abd	25.47	-27.75	32.05	33.50	- 6.38=A B D	251.0640
cd	3.15	0.51	47.03	4.18	- 48.78=C D	148.7180
acd	4.29	-37.06	-26.55	-38.56	109.58=A B D	750.4860
bcd	21.84	1.14	-37.57	-73.58	- 42.74=B C D	114.1692
abcd	17.65	- 4.19	- 5.33	32.24	105.82=A B C D	699.8670

表 5 3次振巾の分散分析表

変 動 原 因	自乗平均	自 由 度	分 散	F 値	F (95%)	F (95%)	有意水準	
主 効 果	バイト形状ミ	28.68	1	28.68	0.13	4.84	9.65	—
	切込	2838.23	1	2838.23	12.48	—	—	99%
	縮付モメント	290.19	1	290.19	1.28	—	—	—
	切削速度	0.48	1	0.48	—	—	—	—
誤 差	2502.17	11	227.47					
合 計		15						

ものとして除いてある。相関係数を求めると、 $r_2 = 0.785$ (2次), $r_3 = 0.983$ (3次), $r_4 = 0.820$ (4次), となって、いずれも強い相関が認められる。

次に1次振巾の増巾率を YETES の方法により解析したものを表2に、分散分析したものを表3に示す。

その結果、主効果では切込ミが、又バイト形状と切削速度の交互作用がいずれも95%で有意である。切込ミに関しては表2中効果Bが正であることから、切込ミの大きい方が大きな増巾率となることを示している、これは(その1)において考察したことと同様に、切込ミの増加によって、切削抵抗が増し、これによって、切込ミの変動の影響が顕著となったものと考えることが出来る。しかし本実験での切込みは0.1mm及び1.0mmであり、この範囲では図2に示す如く、切込ミの大きいほど増巾率が低下していることから、この様な傾向はバイト形状や切削速度等にも支配されていることを示す。交互作用、バイト形状と切削速度においては、片刃バイトで20m/minのものが最大の増巾率を示している。これは片刃バイトではすくい角が小さいこと。又偏心とこれによる切込ミ変化、従って切削力変化による水平方向変位の位相遅れは切削速度によることを考え合せると説明出来ると思われるが、十分な検討を行っていない。

次に3次振巾について、要因の効果を求めるために YETES の方法によって分析したものを表4に、分散分析したものを表5に示す。

ここで主効果Bのみが正の値を取り、高度に有意であることから、本実験の範囲では、切込ミの大きいほど3次振巾が大きいことを示す。これも上と同様に、切込ミの大きいほど切削力が大で、静的コンプライアンスの曲げに対する方向性²⁾によって生ずることは明らかである。一方3次振巾の位相角は実験の繰返しによる相関が弱く、再現性のないことが認められ、同一実験条件の変位波形に再現性のない主な原因となっている。これは、コンプライアンスの方向性が不変であるとしても、切削力の方向、すなわち、主分力と背分力の比が変動してい

ることを示す。

5. 結 言

旋削仕上面に生ずるごく低サイクルのうねりに関連して、被削物と刃物との相対振動を分析し、ほぼ次の結果を得た。

- 1) 切削時の相対振動は、低サイクルと高サイクルの2つの領域をなしている。
- 2) 低サイクル振動は、空転時にはほとんど見られない。
- 3) あらかじめ、チャッキングの際に被削物に偏心を与えて切削をおこなうと、これは被削物一回転を周期とする相対振動とみなし得るが、その振巾(1次振巾)は空転時と切削時では相違する。
- 4) 1次振巾の切削による増巾率は、ほぼ、切込ミの増大につれて大きくなる。しかし、切削条件によっては、極小値を示すことも有り得る。
- 5) 3次振巾については、バイト形状、切込ミ、締付モーメント、切削速度などの諸条件中、切込ミの影響が特に大きい。
- 6) 3次の位相角は実験の繰返しによる相関が弱い。

本実験の遂行に当たり、終始御協力を戴いた本校実習係の諸氏、ならびに当時学生、松本隆司・堀 寛昭の諸君に感謝致します。なお本報告の一部は、本年6月機械学会秋田地方講演会において発表したものである。

文 献

- 1) 門脇・後藤, 秋田高専研究紀要 5, 13 (1970)
- 2) " 7, 33 (1972)
- 3) 星鉄太郎, Saqhier Mehdi RIZVI 精密機械 35, 1, 8. (1969)
- 4) 土井静雄, 工作機械の振動 日刊工業