

旋削中の被削物の振動と仕上げ面のうねり について (第2報)

—— 実験計画法による静的な検討 ——

門 脇 義 次 後 藤 美千男

Turning Vibration of Workpiece and Undulation Remained on the
Machined Surface. (2nd Report)

—— Static Investigation by the Design of Experiments ——

Yoshitugu Kadowaki, Mitio Goto.

(昭和46年10月28日受理)

1. 緒言

前報⁽¹⁾において、著者等は、三ツヅメスクロールチャックを用い、きわめて長い突出しによる旋削の結果、被削物はほぼ主軸一回転を周期として変位し、この変位の水平方向成分と、旋削後の断面形状におけるうねりとがほぼ一致すること。さらに、主軸一回転中の周波数スペクトル⁽²⁾によって、チャックの爪の影響と考えられる第3次のスペクトルが長いこと。などを明らかにした。

チャックの爪の影響⁽³⁾について、静的にのみ認められるとする報告がある。しかし、前報⁽¹⁾において、長い突出しによったことを考慮すれば、一般の切削、あるいは動的な実験においても、チャックの爪の影響は現われるが、その量は少なく、無視されて来たものと考えられる。しかも、チャックの爪による影響が少ない場合であってもこれが強制振動の加振源となり、主軸の回転数が、被削物を含む主軸系の固有振動数をチャックの爪数で除した値に近い場合には、励振されることが考えられる。

チャックの爪の影響を定量的に求めるため、その第一段階として、静的に実験を行い、一応の成果を得たので報告する。

2. 実験方法

2.1 測定方法 試験片を含む、主軸系の、荷重による変位を測定するため、図1に示す如く、チャックに締付けた試験片の左端におもりをかけ、この時の垂直方向の変位を、ダイヤルゲージ⁽⁴⁾によって測定した。

荷重及び測定⁽⁵⁾の方向は、前報から、水平方向が望ましいが、チャックの爪の影響を調べることに重点を置き、

これは、いづれ⁽⁶⁾の方向にも等価であると考えて、最も単純な方法によったものである。

なお、大隈鉄工所製、450×1250 (5 kw) を供試旋盤とし、北川製作所製、三ツヅメスクロールチャック (6-700N) を取付けて用いた。

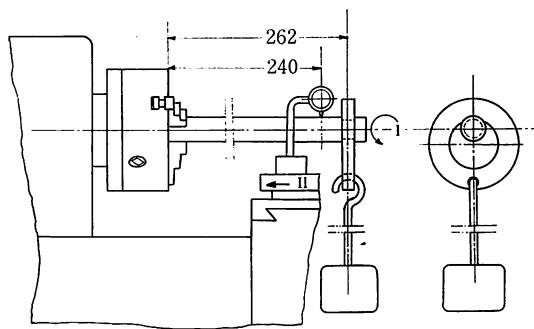


図1 測定方法

一方、試験片は荷重点に深サ1.5 mmの溝を有している。

表1 2⁴型要因実験における要因と水準

	要 因			
	材質(A)	直径(B)	締付モーメント(C)	荷重(D)
低水準	軟鋼(1)	20mm (1)	5.2kg-m(1)	23.4kg(1)
高水準	铸铁 a	40 mm b	8.1kg-m(c)	43.4kg d

2.2 実験計画法 切削などの様に、影響する要因が多いと予想される場合には、実験計画法によって、その

影響の度合を調べておくことが、実験の第一段階として有効であり、本実験では、⁽⁴⁾2⁴型要因実験を採用した。この際の、要因ならびに水準を表1に示す。

各要因において、その水準は、一般に行われている作業条件から、極端に過ぎないもの二つを選んでいる。

なお、鋳鉄は、試験片間のバラツキが少ないと考えて連続鋳造法による製品を用い、チャックの締付けモーメントは、熟練した旋盤工が締付ける力を、チャックハンドルにはりつけたストレンゲージによって測定し、これをもとに決めたものである。しかし、チャックの締付けは、ハンドルに加わるモーメントのみでは決定されず、締付け速度も影響すると思われる。これは同一実験者により、出来る限り一定速度で締付ける様に注意しつつ行った。

図1の様に、突出しが長い場合は、荷重による変位の内、試験片のたわみによって、生ずる部分が主であることを考えると、材質、直径、及び荷重の各要因は独立でないことも予想される。しかし、チャックの爪のたわみの影響も同様に大きいものとし、一応これらを独立に扱った。もし、この様な仮定が正しくないとなれば、分析の際に交互作用として、有意となるはずである。⁽⁵⁾

3. 実験結果

3・1 実験結果の整理 初め、荷重を加えず、手で静かに回転し、15°おきのダイヤルゲージの読みを、回転角を横軸として整理し、無負荷曲線と名づけた。

無負荷曲線は試験片をチャックに締付ける際の偏心、すなわち、主軸一回転を周期とする三角函数と、表面粗さなどの形状誤差を加えたものである。

次に、荷重を加えた場合の読みを、無負荷の場合と同様な整理をし、負荷曲線と名づけた。負荷曲線では、初めの数回転まで、ほとんど周期性のないことが判り、30回転以後の測定結果のみ用いた。

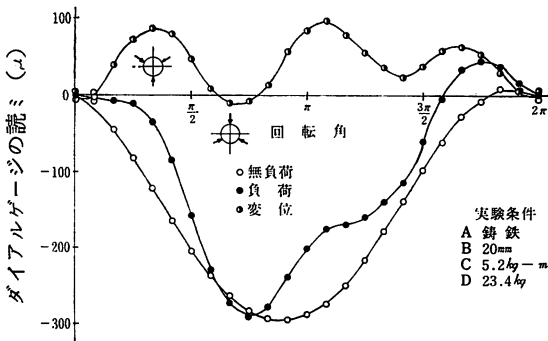


図2 無負荷曲線、負荷曲線、変位曲線の例

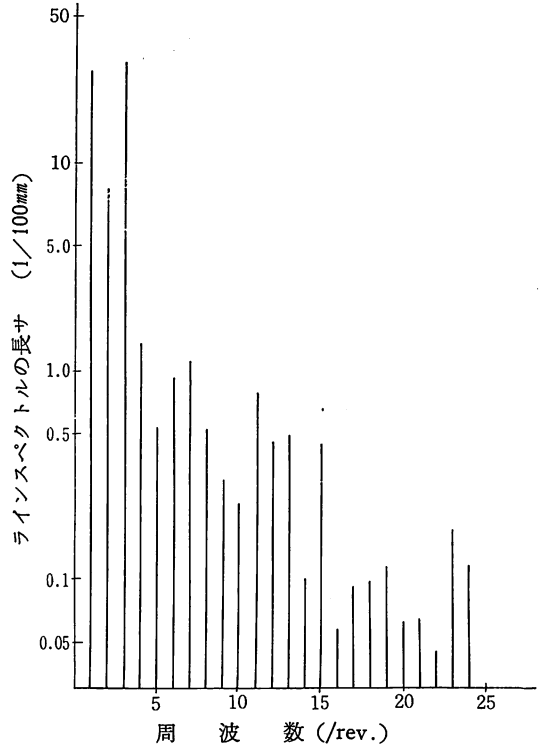


図3 離散的スペクトルの例
実験条件
軟鋼, 20φ, 5.2kg-m, 23.4kg

負荷曲線と無負荷曲線との差を、各回転角について求め、変位曲線と名付けた。これにより、取付の際の偏心や形状誤差が除かれたことになる。

以後の解析は主として、この変位曲線に関して行ったものである。

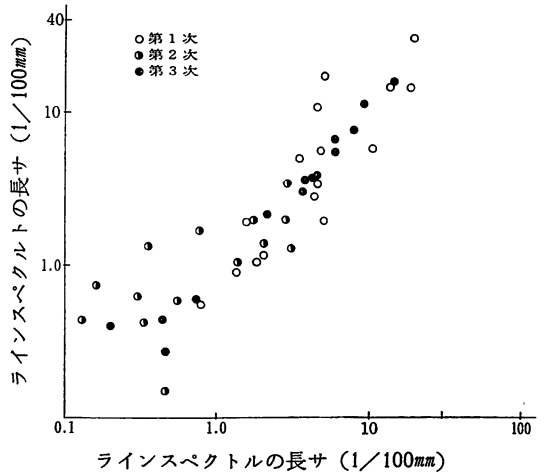


図4 実験の繰返しによる相関

上記の三曲線の一例を図2に示す。

変位曲線を、時系列函数と同様に取扱い、かつこれが主軸一回転を周期とする周期波形であることから、主軸一回転内での、離散的周波数スペクトルを求めた。

離散的周波数スペクトルの代表的な一例を図3に示す。

さらに、本実験における、測定ならびに計算結果の再現性を吟味する目的で、同一条件での実験を二回行った。二回目の場合は前回と同一の試験片を用い、チャックに対し、60°回して締付け、爪が前回の個所に当ることを避けて行った。二回の実験結果について、第3次迄のラインスペクトルを相関図として表わしたものが図4

である。

図4によって、第3次のスペクトルは再現性の強いことを示している。

3・2 実験結果と考察 各条件での離散的周波数スペクトルにおいて、個々のラインスペクトルを指すのに、第1次のスペクトル、第2次のスペクトルなどの様に呼び、しかも、これらの各スペクトルは各々異なる物理的原因、ないしその組合せによって生ずると仮定して、次の様な解析を行った。ただし、図3によつて、第4次以上のスペクトルは短いことが判り、前報と同様にこれを省略した。

3・2・1 第1次のスペクトル ラインスペクトルの

表2 YETES の方法による第1次スペクトルの比較解析

実験条件	変位成分	計			算	二乗平均
		(1)	(2)	(3)	(4) = 効果	
1	4.30	6.30	10.29	19.23	100.03 = Total	
a	2.00	3.99	8.94	80.80	-8.75 = A	4.7852
b	2.46	6.83	27.69	-5.91	-22.31 = B	31.1085
a b	1.53	2.11	53.11	-2.84	37.15 = A B	86.2577
c	5.02	18.15	-3.23	-7.03	24.07 = C	36.2103
a c	1.81	9.54	-2.68	-15.28	13.97 = A C	△ 12.1976
b c	0.79	29.89	-8.13	5.11	-0.47 = B C	△ 0.0138
a b c	1.32	23.22	5.29	32.04	16.15 = A B C	△ 16.3014
d	13.39	-2.30	-2.51	-135	61.57 = D	236.9291
a d	4.76	-0.93	-4.72	25.42	3.07 = A D	△ 0.5891
b d	4.52	-3.21	-8.61	0.55	-8.25 = B D	△ 4.2539
a b d	5.02	0.58	-6.67	13.42	26.93 = A B D	45.3266
c d	19.34	-8.63	1.37	-2.41	26.77 = C D	44.7896
a c d	10.54	0.50	3.74	1.94	12.87 = A C D	△ 10.3523
b c d	4.56	-8.81	9.13	2.37	4.35 = B C D	△ 1.1827
a b c d	18.66	14.10	22.91	13.78	11.41 = A B C D	△ 8.1368

△印=分散分析における誤差変動

表3 第1次スペクトルの分散分析表

変動原因	二乗和	自由度	分散	F 値	F 値(95%)	F 値(99%)	有意水準	
主効果	材質	4.7852	1	4.7852	0.7165	5.32	11.26	—
	直径	31.1085	1	31.1085	4.6580	〃	〃	—
	締付モーメント	36.2103	1	36.2103	5.4219	〃	〃	95%
	荷重	236.9291	1	236.9291	35.4764	〃	〃	99%
交互作用								
材質と直径と荷重	45.3266	1	45.3266	6.7869	〃	〃	95%	
材質と直径	86.2577	1	86.2577	12.9157	〃	〃	99%	
締付モーメントと荷重	44.7896	1	44.7896	6.7065	〃	〃	95%	
誤差	53.4276	8	6.6785					
合計		15						

長さについて、各要因の効果を Yetes の方法⁽⁶⁾によって解析したものを表 2 に示す。ここで実験条件は、低水準をすべて 1 とし、高水準を a, b, c, d, としたものであり、それらの組合わせを積の形で表わす。

(例えば、すべてが低水準の組合わせの場合は $1 \times 1 \times 1 \times 1 = 1$ とし、すべてが高水準の場合は、 $a \times b \times c \times d = a b c d$ とする)

表 2 にもとずき、分散分析を行ったものが表 3 である。表 2, 表 3 等から、有意水準の高い順に検討を加えると、

- (1) 主効果 D が正の値を取って有意であることから、荷重の大きい方が、ラインスペクトルは長い。
- (2) 交互作用 A B が有意であることから、ラインスペ

クトルの長さを比較すれば、軟鋼の 20φ, 鋳鉄の 20φ, 軟鋼の 40φ, 鋳鉄の 40φ の順に短くなり、直径が小さく、軟らかい材質ほど、長いラインスペクトルを有すると考えてよい。

- (3) 試験片のたわみの影響を直接表わすと考えられる交互作用 A B D は有意である。一方、ラインスペクトルの長さは、軟鋼の 20φ と 43.4kg, 鋳鉄の 40φ と 23.4kg などの順に短くなる。

これが試験片のたわみによるものとすれば、縦弾性係数が小さく、直径が小さく、荷重の大きな組合せほど、長いラインスペクトルを有するはずであって、上記の順序よりすれば、単なる試験片のたわみによるものとは考えられない。

表 4 YETES の方法による第 2 次スペクトルの比較解析

実験条件	変位成分	計			算		二乗平均
		(1)	(2)	(3)	(4) = 効果		
1	0.16	1.84	2.45	5.51	17.14 = Total		
a	1.68	0.61	3.06	11.63	5.92 = A	2.1904	
b	0.29	2.74	4.04	2.91	-10.72 = B	7.1824	
a b	0.32	0.32	7.59	3.01	-3.42 = A B	△ 0.7310	
c	0.75	3.55	1.55	-3.63	4.16 = C	1.0816	
a c	1.99	0.49	1.36	-7.07	-1.78 = A C	△ 0.1980	
b c	0.10	5.80	2.30	-2.61	-2.14 = B C	△ 0.2862	
a b c	0.22	1.79	0.71	-0.81	3.24 = A B C	△ 0.6561	
d	0.74	1.52	-1.23	0.61	6.12 = D	2.3409	
a d	2.81	0.03	-2.42	3.55	0.10 = A D	△ 0.0006	
b d	0.13	1.24	-3.06	-0.19	-3.42 = B D	△ 0.7310	
a b d	0.36	0.12	-4.01	-1.59	1.80 = A B D	0.2025	
c d	2.98	2.07	-1.49	-1.19	2.94 = C D	△ 0.5402	
a c d	2.82	0.23	-1.12	-0.95	-1.40 = A C D	△ 0.1225	
b c d	0.46	-1.16	-1.84	0.37	0.24 = B C D	△ 0.0036	
a b c d	1.33	0.87	-1.03	7.87	2.50 = A B C D	△ 0.3906	

△印=分散分析における誤差変動

表 5 第 2 次スペクトル分散分析表

変 動 原 因	二乗和	自由 度	分 散	F 値	F 値(95%)	F 値(99%)	有意水準	
主 効 果	材 質	2.1904	1	2.1924	5.9847	4.96	10.04	95%
	直 径	7.1824	1	7.1824	19.6240	〃	〃	99%
	締付モーメント	1.0816	1	1.0816	2.9552	〃	〃	—
	荷 重	2.3409	1	2.3409	6.3959	〃	〃	95%
交 互 作 用 材 質 と 直 径 と 荷 重	0.2025	1	0.2025	0.5527	〃	〃	—	
誤 差	3.6598	10	0.3660					
合 計		15						

(4) 交互作用CDに関しては、締付モーメントの大きな場合と大荷重との組合せで、ラインスペクトルが長いことを示している。

(5) 主効果Cが正の値を取って、有意であることから締付けモーメントの大きい方が長いラインスペクトルを有する。

以上を総合すると、第1次のスペクトルは、荷重と締付けモーメントとに左右されるものであり、単なる試験片のたわみによるものではないことが判る。しかも図4によって、このラインスペクトルの長さは、再現性に乏しく、ここにのべた要因によって、その原因を表わすことは出来ないが、荷重を加える際に加え方、(初め、おもりをかける時、多少の打撃を伴なう。)によって、試

験片に、チャックの爪によるくぼみが生ずるためと考えられる。この様な、くぼみの深さは、締付モーメント、試験片の軟らかさ、などに影響されることは、明らかである。

3・2・2 第2次スペクトル 図3及び図4によってこのラインスペクトルは、一般に、第1次及び第3次のものに比較し、短いことが判る。これは前報⁽¹⁾における切削実験でも、ほぼ同様の傾向が見られた。

ラインスペクトルの長さについて、各要因の効果を、第1次と同様に解析した。これを表4及び表5に示す。

表4、及び表5によって、直径、荷重、材質の影響が明らかである、すなわち、有意水準の高い要因から述べると、

表6 YETES の方法による第3次スペクトルの比較解析

実験条件	変位成分	計			算	二乗平均
		(1)	(2)	(3)	(4) = 効果	
1	3.67	7.95	8.62	14.77	63.26 = Total	
a	4.28	0.67	6.15	48.49	14.70 = A	13.5056
b	0.21	5.82	29.94	2.63	-38.66 = B	93.4122
a b	0.46	0.33	18.55	12.07	4.06 = A B	△ 1.0302
c	2.10	23.25	0.86	-12.77	-13.86 = C	12.0062
a c	3.72	6.69	1.77	-25.89	-7.78 = A C	△ 3.7830
b c	0.09	13.94	10.38	-1.83	9.02 = B C	△ 5.0850
a b c	0.24	4.61	1.69	5.89	4.54 = A B C	△ 1.2882
d	9.06	0.61	-7.28	-2.47	33.72 = D	71.0649
a d	14.19	0.25	-5.49	-11.39	9.44 = A D	△ 5.5696
b d	0.72	1.62	-16.56	0.91	-13.12 = B D	△ 10.7584
a b d	5.97	0.15	-9.33	-8.69	7.72 = A B D	3.7249
c d	7.99	5.13	-0.36	1.79	-8.92 = C D	△ 4.9729
a c d	5.95	5.25	-1.47	7.23	-9.60 = A C D	△ 5.7600
b c d	0.44	-2.04	0.12	-1.11	5.44 = B C D	△ 1.8496
a b c d	4.17	3.73	5.77	5.65	6.76 = A B C D	△ 2.8561

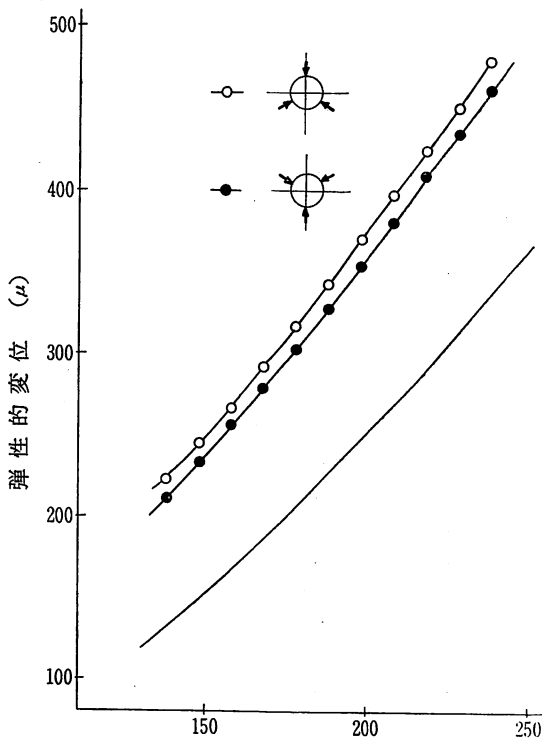
△印=分散分析における誤差変動

表7 第3次スペクトルの分散分析表

変動原因	二乗和	自由度	分散	F 値	F 値(95%)	F 値(99%)	有意水準	
主効果	材質	13.5056	1	13.5056	3.1443	4.96	10.04	—
	直径	93.4122	1	93.4122	21.7475	〃	〃	99%
	締付モーメント	12.0062	1	12.0062	2.7952	〃	〃	—
	荷重	71.0649	1	71.0649	16.5448	〃	〃	99%
交互作用 材質と直径と荷重	3.7249	1	3.7249	0.8672	〃	〃	—	
誤差	42.9530	10	4.2953	0.8672				
合計		15						

- (1) 主効果Bが負の値を取って、有意であることから直径の小さい方が、ラインスペクトルは長い。
- (2) 主効果Dが正の値を取って、有意であることから荷重の大きい方が、ラインスペクトルは長い。
- (3) 主効果Aが正の値を取って、有意であることから鋳鉄の方がラインスペクトルは長い。

以上を総合して、第2次のスペクトルの原因として、たわみが上げられる。しかし、交互作用ABDの有意味水準が低いことから、試験片自体のたわみとは考えられず試験片一回転に付、二度ピークの存在する現象について目下実験中である。



チャック本体端面からの距離 (mm)

図5 チャックの爪の位置による弾性的変位の相違

(実線は試験片を片持ばりと仮定した、たわみの計算値である。
荷重点はチャック本体端面より280mmである)

3・2・3 第3次のスペクトル ラインスペクトルの長さについて、各要因の効果を、第1次、第2次と同様に解析した。その結果を、表6、表7に示す。

表6、表7によって、直径と荷重の影響が明らかである。すなわち、

- (1) 主効果Bが負の値を取って、有意であることから直径の小さい方が、ラインスペクトルは長い。

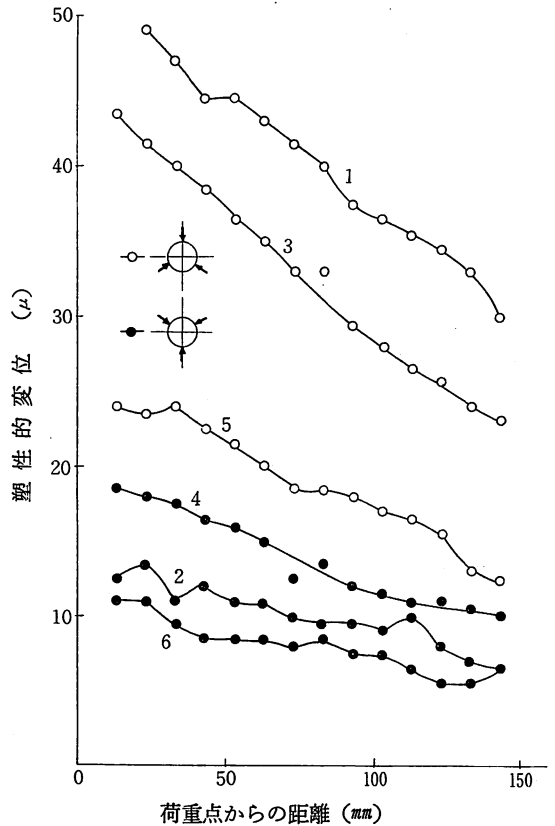


図6 チャックの爪の位置と荷重と除去の繰返しによる塑性的変位の相違

(図中の数字は、測定番号を示し、1以上)では荷重、除去の前歴があることを示す)

- (2) 主効果Dが正の値を取って、有意であることから荷重の大きい方が、ラインスペクトルは長い。

しかし、第2次の場合と同様、交互作用ABDが有意でないことから、第3次のスペクトルの原因は、試験片自体のたわみによるものとは考えられない。

さらに、ここに例示はしないが、第3次のスペクトルにおける、位相の遅れは、いづれもほぼ60°であった。

このことは、図2に示す、変位曲線の一例においても明らかであり、チャックの爪の一つが、真上にあるとき最も変位しやすいことを示している。

これを、確認するため、ほぼ上記と同様の測定を、試験片の軸方向について行った。この際の供試旋盤は、池貝鉄工所製 EC/18 400×800 (3.7kw) であり、これに、北川製作所製 三ツツメスクロールチャック (6-828) を取付けたものである。

試験片は、軟鋼、25.8φ、荷重点までの距離を280mm、つかみ代35mmとした。

軸方向のダイヤルゲージの移動は刃物台の縦送りによ

った、移動の際の誤差、ならびに、試験片の取付誤差を除くため、最初、無負荷状態で、各測定点での、ダイヤルゲージの読みをⅠとし、負荷状態で、同様な読みをⅡ、さらに荷重除去後の読みをⅢとして、ⅡとⅢの差を弾性的な変位、ⅢとⅠとの差を塑性的な変位と見なした。

図5にチャックの爪の一つが真上に来る場合の三点と真下に来る場合の三点の、各測定位置(軸方向)での弾性的な変位の平均を示す。なお、同図に示す二線の間には、統計的にも有意差があり、弾性的な変位には、チャックの爪の位置による相違が明らかである。

又、チャックに締付けた試験片を、片持ばりと仮定した計算値を、同図に、実線で示してある。しかし、爪のたわみを考慮して居らず、実際の変位との間に大きな相違がある。チャック本体の端面を一応固着端と見なし、参考のため示したものである。

一方、図6に、塑性的な変位を示す。この様な塑性的変位は、チャックの爪の位置の他、同一条件であっても何番目に測定したかによって異なる。これは、前回の実験において、負荷状態で、初めの数回転は、周期的な変位とならない理由が、この様な、塑性的変位の変動によるものであることを示している。

以上のことから、第3次のスペクトルは、チャックの爪によって起こることは明らかである。

3. 結 言

三ツツメスクロールチャックを用いた旋削において、切削中の被削物の水平方向変位に関する、周波数スペクトルによれば、爪の影響と考えられる第3次のスペクトルが、比較的長いことから、被削物を含む主軸系の、荷重による変位について、実験計画法により、静的な検討を行った。その結果、旋削における場合と、ほぼ同様の傾向を示し、

- (1) 試験片を含む主軸系の、先端荷重による、荷重方向の変位は、初めの数回転を除いて、ほぼ周期的である。なおこの際の周期は、主軸系の一回転に相当する。
- (2) この周期波数の周波数スペクトルによれば、第1次と第3次が支配的であり、第4次以上はごく小さい。
- (3) 第1次のスペクトルの主原因は、試験片に生じたチャックの爪による、塑性的変形と考えられる。
- (4) 第3次のスペクトルの原因は、チャックの爪の位置によって剛性が異なるためと考えられる。
- (5) 材質、及びチャックの締付モーメントによる効果は、荷重及び直径の効果に比べ小さい。

などの事項が明らかとなった。

最後に、本実験に終始協力を戴いた本校実習系の諸氏ならびに当時学生、相原昭雄、山内拓二の諸君に感謝致します。

又、京都繊維工芸大学教授、井上友一氏には多くの示唆を戴きました。ここに記して、感謝の意を表します。

なお、周波数スペクトルなどの計算には、東北大学大型計算機センターを煩わした。

文 献

- 1) 門脇, 後藤 秋田高専研究紀要 5, 13, (1970)
- 2) 中村常郎 機械の研究 23—5 775 (1971)
堀井 明 ランダム変動の解析 共立
- 3) 井上友一 精密機械 23—3 15
- 4) 奥島啓次, 人見勝人, 棚橋次彦
機械学会論文集 33—255 1869 (1966)
- 5) W.G.Cochran G.M.COX
実験計画法(Ⅰ), 丸善
北川敏男 実験計画法講義(Ⅱ), 培風館
- 6) S.A.Tobias Machine-Tool Vibration, Blackie