

航空宇宙技術研究所報告

TECHNICAL REPORT OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TR-675

振動の監視による転がり軸受の故障の早期発見の研究

(第2報 グリース潤滑玉軸受)

星 谷 昌 二 ・ 関 勝 美
西 尾 健 二 ・ 宮 地 敏 雄

1981年7月

航空宇宙技術研究所
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

振動の監視による転がり軸受の故障の早期発見の研究*

(第2報 グリース潤滑玉軸受)

星 谷 昌 二** 関 勝 美***

西 尾 健 二** 宮 地 敏 雄**

An Investigation of the Early Detection of Defects in Ball Bearings by the Vibration Monitoring (Second Report, Grease Lubricated Ball Bearings)

By

Shoji HOSHIYA, Katsumi SEKI,
Kenji NISHIO and Toshio MIYACHI

ABSTRACT

Utilizing a life test rig for rolling element bearings, the time histories of the vibration of grease lubricated test ball bearings were monitored. Vibration was detected by a piezoelectric accelerometer mounted on the bearing housing and was recorded by a magnetic tape recorder which was controlled by a microcomputer.

In total, twenty-seven bearings were tested, and flaking failures were generated in twenty-six of them; nineteen on the outer races, five on the inner races and two on the balls. In most cases, flakings grew gradually with obvious changes of vibration, thus enabling the early detection of the defects in the bearings. However, in some bearings, flakings were generated very rapidly, limiting the usefulness of the condition monitoring.

1. まえがき

転がり軸受から運転中に発生する振動が軸受の内部の状態の変化に対応して変化することを利用し、故障を早期発見しようとする試みが近年さかんに行われている。また、この目的に使用する測定器も発表され、商品化されているものもある。しかしなが

ら、実際の使用状態において転がり軸受の異常がどのような前兆から始まり、どれほどの速さで成長して致命的な故障に至るか、と云う問題が十分に解明されているわけではないので、振動の監視によってどの程度有効な予防保全が可能となるか、必ずしも明らかではない。振動の監視を予防保全に活用するための基礎資料として、異常の成長過程と、それにとまなう振動の変化が明らかにされなければならない。

第1報では40番モータ油で潤滑した単列深みぞ玉軸受27個の寿命試験中の振動を記録、分析した結果

*昭和56年6月26日 受付

** 原動機部

*** 宇宙研究グループ

について述べ、油膜パラメータが大きい場合、すなわち潤滑条件が良い場合には、はく離が突発的に生ずることはほとんどないが、油膜パラメータが小さい場合には、少数であるが、はく離が突発することがあることを明らかにした。⁽¹⁾また、振動の分析結果から軸受内部の状態を診断できることを明らかにした。

次いで、転がり軸受の故障および振動が潤滑剤にどのように依存するかを調べることを目的として、40番モータ油に続いてグリースを用いて同様の試験を行ったので報告する。

2. 実験装置と実験方法

試験軸受の潤滑法が前報では40番モータ油の重力循環給油方式であったのに対し、本報告ではグリース封入方式としたことが大きい相違である。その他の実験装置と実験方法は前報に述べたものと同様であるから、要点だけを記す。

現在、我国では日本学術振興会第126委員会の計画に従って、軸受メーカ、大学、研究所等で転がり軸受の寿命試験が組織的に行われている。⁽⁴⁾本報告に述べる試験はこの組織的な試験の一部として当研究所で行ったものである。

試験機としては図1に示す学振式転がり軸受寿命

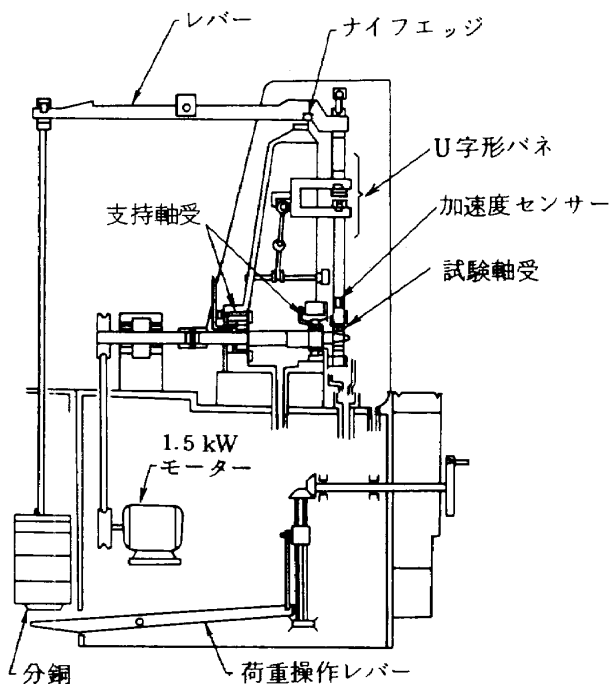


図1 学振式転がり軸受寿命試験機

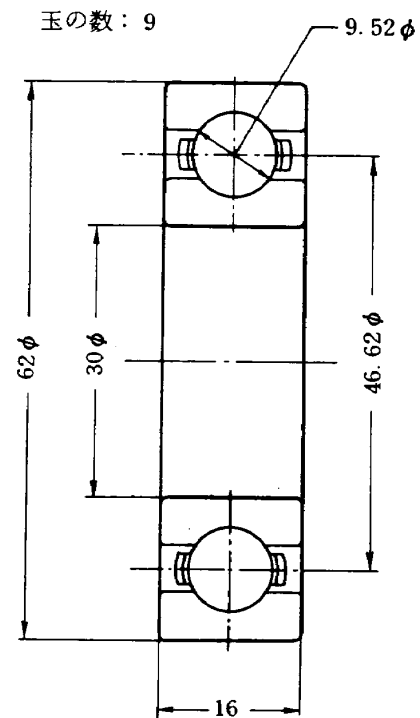


図2 試験軸受

試験機を用いた。

試験軸受は転がり軸受の系統的な寿命試験のため、特別に製作された内径30mmの単列深みぞ玉軸受（呼び番号6206、精度上級）である。すきまは22～35 μm 、保持器は打抜き保持器を用いている。形状を図2に示す。

試験軸受は超音波洗浄した後、グリース10 g を充填して試験機に取り付けた。試験軸受の外輪の温度はサーミスターで、また、内輪の温度はスリッピングを介して熱電対で測定した。

試験軸受の回転速度は前報の油潤滑の場合には2000 rpmとしたが、本報告のグリース潤滑の場合には800 rpmとした。

なお、試験軸受以外の寿命試験機の軸受は前報と同様に別の油潤滑システムによって潤滑している。

試験軸受に加える荷重は前報と同様に半径方向荷重1000 kgfとした。軸方向荷重は加えていない。なお、荷重は回転速度が定格値に達してから加えた。

試験軸受の振動の検出、記録および分析も前報と同様に図3に系統図を示した装置を用いて行った。すなわち、試験軸受のハウジングに取り付けた圧電型加速度センサーの出力を電荷増幅器で増幅し、マイクロコンピュータ、打点式ペンレコーダおよび磁

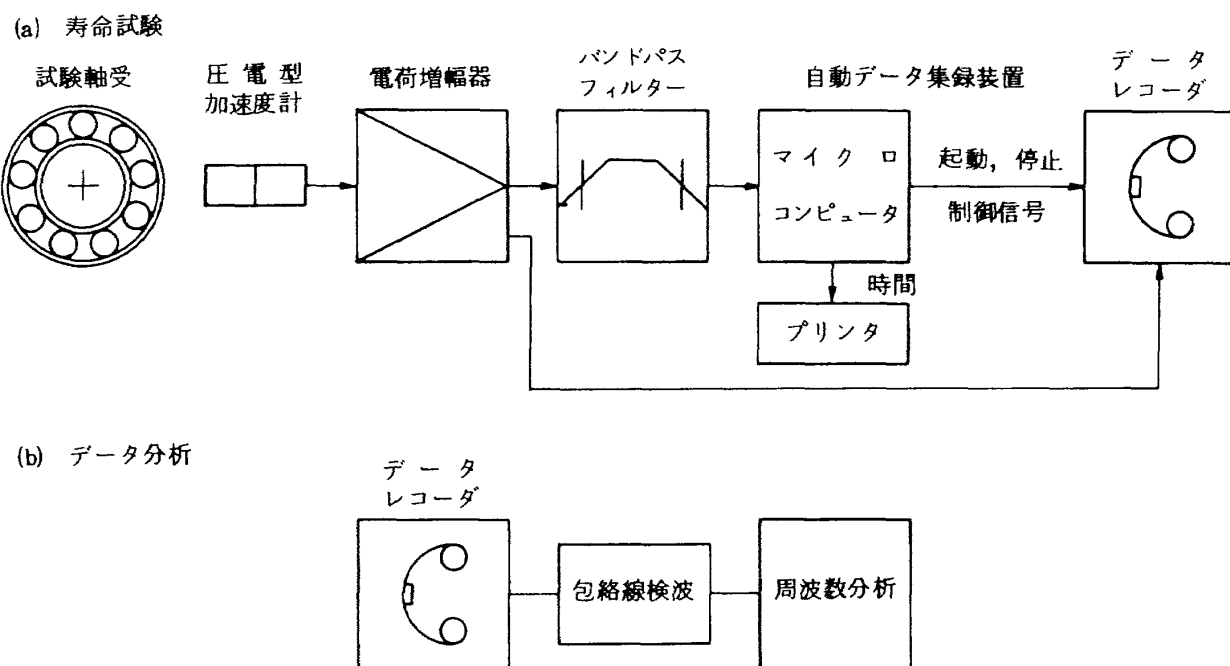


図3 自動記録と分析の系統図

気テープレコーダに送る。打点式ペンレコーダは連続的に振動の rms 値を記録するのに対し、磁気テープレコーダはマイクロコンピュータによって制御され、振動の 0.4 秒間の平均値が 6% 以上変化したときだけ短時間（約 15 秒）の記録をとる。また、マイクロコンピュータの指令により、プリンタがその記録をとった時刻を印字する。

なお、試験軸受の寿命の中期には長時間、軸受内部の状態が安定しており、振動の変化が少ないので、磁気テープレコーダによる自動記録は全く行われなくなる。そこで、この期間は適宜、手動で記録した。

また、毎朝夕、振動のほか内輪温度、外輪温度、回転速度などの指示計器を読み、異常の発生を監視した。

磁気テープに記録したデータは 1 個の軸受の寿命試験が終了した後、高速フーリエ変換器（Fast Fourier Transform, 以下では FFT と記す）によって周波数分析した。周波数分析は振動波形そのまま、および振動波形を包絡線検波したものの両方について行った。

以上のような装置と方法でグリース潤滑の場合について 27 個の軸受の寿命試験を終了した。

使用したグリースは表 1 に示したグリース A, B, C, D およびグリース C に固体潤滑剤を添加したグ

リース C-1, C-2, C-3 の 7 種類である。

試験した軸受は通し番号 117 から 143 までの 27 個である。そのうち 117 から 133 までの 17 個は添加剤を含まないグリースを用いて試験した。グリースの種類は 117 に A, 118 に B, 119 に C, 120 に D と云う順序で、以下番号順, A B C D 順にくりかえし変更した。

試験軸受 134 から 143 までの 10 個は添加剤を含むグリースを用いて試験した。グリースの種類は 134 に C-1, 135 に C-2, 136 に C-3 の順序で、以下番号順にくりかえし変更した。

寿命試験終了後、試験軸受を分解し、内部の破損状態を検査した。破損はすべて、外輪、内輪あるいは玉の表面のはく離であったので、その形状、寸法を三次元座標測定器⁽⁶⁾で測定した。

なお、試験軸受はプレス加工された 2 枚の鋼板をリベットで結合した、いわゆる打抜き保持器を使用した深みぞ玉軸受であるため、分解するには保持器を破壊しなければならない。そのため、試験の途中で分解し、内部を検査することは行っていない。

3. 試験結果と考察

3.1 寿命と破損の形

添加剤を含まないグリースを用いて試験した通し

表1 試験グリース

グリース名称		A	B	C	D	
基油		90番タービン油	40番モータ油	140番タービン油	140番タービン油 (ナフテン系)	
見掛粘度 Poise	shear rate S ⁻¹	10	1140	1320	1330	910
		25	490	600	600	430

グリースCに加えた添加剤

グリース名称	C-1	C-2	C-3
添加剤種類, 量	MoS ₂ , 3%	MoS ₂ , 3%	グラファイト, 3%
添加剤の平均粒度	3.5 ± 0.5 μm	0.4 ± 0.1 μm	200# 95%以上 300# 85%以上

番号117から133までの17個の試験軸受の寿命、破損の形、試験中の内外輪の温度および3.3に述べる振動に変化が確認されてから致命的な破損に至るまでの時間を表2に示した。

添加剤を含むグリースを用いて試験した通し番号134から143までの10個の試験軸受についても同様の結果を表3に示した。

破損の形と個数は、添加剤なしの場合、外輪はく離12個、内輪はく離5個である。添加剤を含む場合には外輪はく離7個、玉はく離2個および2500時間以上破損せず、試験を打切ったもの1個である。

両者を合計すると、外輪はく離19個、内輪はく離5個、玉はく離2個および未破損1個となる。

表2および表3に示したはく離の大きさは玉の転動方向の長さ、幅および深さの最大値である。

グリース潤滑の場合の油膜パラメータは、転走面での油の粘度が明確でないため、正確に求められないので、表2、表3には示さなかった。温度が高い場合にはグリースの粘度は基油の粘度とほぼ等しくなるとされているので、基油の粘度を基準として油膜パラメータを求めると次のようになる。

グリースA : 0.55

グリースB : 1.21

グリースC : 0.71

グリースD : 0.92

また、グリースC-1、C-2、C-3の基油はグリースCと同じであるから、油膜パラメータは0.71と

なる。

3.2 オーバーオール振動

各試験軸受のオーバーオールの振動の時間的变化を末尾の付図117~143に示した。付図の番号は試験軸受の番号である。試験開始から寿命が終る直前の数時間までの期間は、通常、振動の変化はあまり激しくないで、この期間の時間軸は約1/1000に縮小して図示した。ここで、オーバーオールの振動と云うのは加速度センサーの出力を60~10000Hzのバンドパスフィルタを通した信号のrms値で、単位は重力加速度 ($G=9.8m/s^2$) である。バンドパスフィルタは試験機の周囲から入る機械的および電気的な雑音の影響を除去するために使用したものである。

まず、付図の時間軸を縮小した部分を見わたすと、寿命の初期ないし中期に不規則な変動があらわれているものが多いことがわかる。すなわち、試験軸受117, 121, 123, 126, 127, 128, 132, 135, 136, 137, 139, 140, 142, 143の14個にこのような変動が認められる。このような寿命初期ないし中期の不規則な変動は第1報に述べた油潤滑の場合にも小数の試験軸受にはあらわれているが、グリース潤滑の場合のように多くはない。

これらに対し、不規則な変動はほとんどなく、寿命の中期ないし末期にかけて徐々に、あるいは段階的に振動が増加しているものがある。試験軸受119, 120, 124, 125, 129, 130, 131, 133の8個はこの

表2 寿命と破損の形 (1) 無添加グリース潤滑

軸受番号	グリース	寿命 h	破 損 の 形					軸 受 温 度 °C	
			はく離 個 所	はく離の大きさ mm			成長時間 h※	外 輪	内 輪
				長さ	幅	深 さ			
117	A	1212.4	内輪, 玉	1.9, 0.6	3.3, 0.7	0.18, 0.13	1.5	53.5~61.0	52.5~60.0
118	B	8.3	外 輪	3.7	4.9	0.3	5.3		
119	C	931.3	外 輪	1.0	1.1	0.06	(2.5)	45.5~54.0	43.5~53.0
120	D	747.0	外 輪	2.1	1.5	0.10	(327)	48.0~52.5	46.5~50.5
121	A	321.4	外 輪	2.9	3.8	0.03	3.8	46.5~48.5	44.5~47.0
122	B	609.4	外 輪	2.6	4.0	0.11	10.8	48.5~55.5	47.0~53.5
123	C	1348.0	外輪, 内輪	2.9, 0.7	3.7, 0.7	0.18, 0.08	72.9	50.5~60.5	48.5~56.5
124	D	86.5	外 輪	0.7	1.1	0.12	(5)		
125	A	519.0	外 輪	3.2	3.6	0.02	6.3	57.5~62.0	55.5~59.5
126	B	962.3	内 輪	3.5	4.0	0.17	165.8	61.0~66.5	57.5~65.0
127	C	1952.4	外 輪	0.8	0.9	0.06	16.0	50.5~59.5	48.0~56.5
128	D	403.4	内 輪	1.1	2.1	0.16	5.3	53.5~57.5	51.5~54.0
129	A	1049.4	外 輪	1.3	2.5	0.19	19.3	46.5~54.0	45.0~52.5
130	B	1207.8	外 輪	2.9	3.0	0.11	235.0	50.0~58.0	48.0~55.0
131	C	63.0	内 輪	1.7	1.7	0.19	1.0	57.0	53.5
132	D	266.4	内 輪	1.2	2.1	0.19	1.0	56.0~59.5	52.5~56.0
133	A	434.4	外 輪	4.2	3.9	0.03	2.4	58.0~60.5	

※ 成長時間は振動に異常が発見されてから、振動が制限値を越えるまでの時間。()内の値はデータレコーダの記録が十分に得られなかった場合の概略値。

表3 寿命と破損の形 (2) 添加剤入りグリース潤滑

軸受番号	グリース	寿 命 h	破 損 の 形					外輪温度 °C
			はく離 個 所	はく離の大きさ mm			成長速度 h	
				長さ	幅	深 さ		
134	C-1	849.7	玉	2.5	2.5	0.12	(2.3)	50.5~58.5
135	C-2	1119.8	外 輪	1.3	1.4	0.07	513.2	48.5~53.5
136	C-3	2580 ~	未破損					49.5~63.0
137	C-1	837.0	玉	1.6	1.6	0.15	0.2	53.0~59.0
138	C-2	975.9	外 輪	0.5	0.6	0.08	82.7	55.0~62.0
139	C-3	64.2	外 輪	0.5	1.9	0.10	4.9	56.5~57.0
140	C-1	225.6	外 輪	0.5	0.9	0.06	58.1	56.5~60.0
141	C-2	1325.6	外 輪	1.0	1.0	0.08	235.4	50.0~60.5
142	C-3	737.8	外 輪	1.8	2.0	0.30	82.0	50.5~54
143	C-1	547.9	外 輪	1.2	1.8	0.18	2.1	45~ 49

ような傾向を示したものである。油潤滑の場合にも同様の傾向を示すものが27個中5個あった。

また、不規則な変動も規則的な増加もなく、寿命の初期から末期のはじめまで、ほぼ一定の振動レベルを維持し、末期になってはじめて振動の増加が始まり、比較的急速に寿命に至るものがある。試験軸受 118, 122, 134, 138, 141 の5個はこのような傾向を示したものである。油潤滑の場合にはこのような傾向を示すものが最も多く、27個中16個がこの型に属する。

上に述べた不規則な変動を生じたものをA群、中期からの増加を生じたものをB群、末期まで変化のないものをC群と呼ぶこととし、最終的な破損の形によって分類すると表4のようになる。

最終的な破損の形は外輪はく離19個、内輪はく離

5個、玉はく離2個、未破損1個であるが、表4を見るかぎりでは破損の形と振動の時間的变化との間に相関があるか否かは明らかでない。そこで、寿命の末期の部分も含めて付図を見ると、次のような傾向があることがわかる。

寿命末期の振動の増加速度に着目すると、

(1) 外輪はく離は成長が遅い。

例：119, 120, 122, 123, 124, 125, 127, 129, 130, 133, 135, 138, 140, 141, 142。

例外：118, 121, (143)。()はどちらとも云えないものを示す。

(2) 内輪はく離は成長が早い。

例：117, 128, 131。

例外：126, (132)。

表4 破損の形と振動の変化(表中の数字は試験軸受番号)

振動の変化	破損の形				合計個数
	外輪はく離	内輪はく離	玉はく離	未破損	
A群 不規則に変動したもの (個数)	121	117	137	136	14
	123	126			
	127	128			
	135	132			
	139				
	140				
	142				
	143				
B群 寿命の中期から増加したもの (個数)	119	131			8
	120				
	124				
	125				
	129				
	130				
	133				
C群 寿命の末期まで変化のなかったもの (個数)	118		134		5
	122				
	138				
	141				
合計個数	19	5	2	1	27

(3) 玉はく離は成長が早い、振動の増加は不規則になることがある。

例: 134, 137。

上記のような傾向は油潤滑の場合にも認められていた。内輪はく離あるいは玉はく離の方が外輪はく離よりも成長速度が早いのは、凸面の方が凹面よりはく離が成長しやすいためと考えられる。また、玉はく離の場合に振動が不規則に変動するのは、玉の自転軸が変わることによって、はく離部分と内外輪の接触状態が変わるためと考えられる。

油潤滑の場合には外輪はく離が、レコーダに振動増加中の記録ができなかったほど突発的に発生したものが2個あったが、グリース潤滑の場合にはそのような突発は生じていない。これは試験を行った回転速度がグリース潤滑の場合800 rpmであったのに対し、油潤滑の場合には2000 rpmとしているため、はく離部への衝撃力に大きい相異があることによると推定される。

以上、付図に示したオーバーオール振動の時間的変化について考察したが、次に、振動波形(振動加速度)を分析した結果も含めて考察する。

3.3 特性振動数成分

転がり軸受の内輪、外輪、転動体のいずれかの転走面上の1点が他の要素と接触する周波数を特性振動数と云う。これには、外輪の転走面上の1点が転動体と接触する周波数 f_o 、内輪の転走面上の1点が転動体と接触する周波数 f_i 、1個の転動体の転走面上の1点が内輪あるいは外輪と接触する周波数 f_b などがある。

これらは前報の(1)~(3)式に軸受の諸元と回転速度を与えれば計算できる。

本報告の場合には、試験軸受の回転速度800 rpm = 13.3 Hzにおいて、

$$f_o = 47.8 \text{ Hz}$$

$$f_i = 71.8 \text{ Hz}$$

$$f_b = 62.5 \text{ Hz}$$

ところが、転走面の損傷と他の要素との接触が軸受荷重を伝達している部分以外で生じたときには、その部分で衝撃が発生しないので、衝撃が発生する周波数は特性振動数と一致しない場合がある。

本報告の試験軸受は単列深みぞ玉軸受で、荷重は

半径方向のみであるため、荷重は軸の下側の限られた部分だけを介して伝達される。そのため、内輪の損傷が衝撃を発生する周波数 f'_i は内輪の回転速度と等しくなる。また、玉の損傷が衝撃を発生する周波数 f'_b は玉の公転周波数と等しくなる。

本報告の場合には、

$$f'_i = 13.3 \text{ Hz}$$

$$f'_b = 5.3 \text{ Hz}$$

ところが、試験軸受の周囲の構造物の固有振動数は上記の特性振動数よりはるかに高い値である。そのため、軸受要素に損傷が生じたときの振動加速度の波形は、軸受が正常な場合の振動波形を特性振動数の鋸歯状波で振幅変調したような波形になる。したがって、振動加速度の波形をそのまま周波数分析しても特性振動数成分を検出することは困難だが、振動加速度の波形を包絡線検波すれば容易に特性振動数成分を検出することができる。以下に寿命試験中の振動と最終的な破損の形との対応について、教例を挙げて説明する。

図4に試験軸受117の f'_b 、 f'_i 、 f_o 成分およびオーバーオール振動の時間的変化を示した。試験軸受117は内輪に大きいはく離が発生したほか、玉にも小さいはく離が発生したものである。(表2参照)

図4によると、寿命初期から中期(約900時間まで)の軸受が正常な期間には各特性振動数成分の値は小さいが、変動幅は大きい。970時間付近で f'_b 成分が一時的に正常時の10倍まで急増している。しかしながら、このときオーバーオール振動は12%程度しか増加していない。その後 f'_b 成分は減少して、ほぼ元の値にもどっている。そして、約200時間後に f'_i 成分が正常時の数十倍に増加している。このときはオーバーオール振動も数倍に増加している。試験軸受117の場合、 f'_b 成分が増加しはじめてからの振動の増加はきわめて早い。 f'_i 成分が一時的に増加して、再び元の値にもどった原因は、玉の表面に発生したはく離が、発生した直後の或る期間は転走面と一致していたが、その後、玉の自転軸が変わることによって、はく離が転走面からはずれたたためと推定される。

図4に①、②、③と記した時点における振動加速度の波形、それを包絡線検波した波形および包絡線

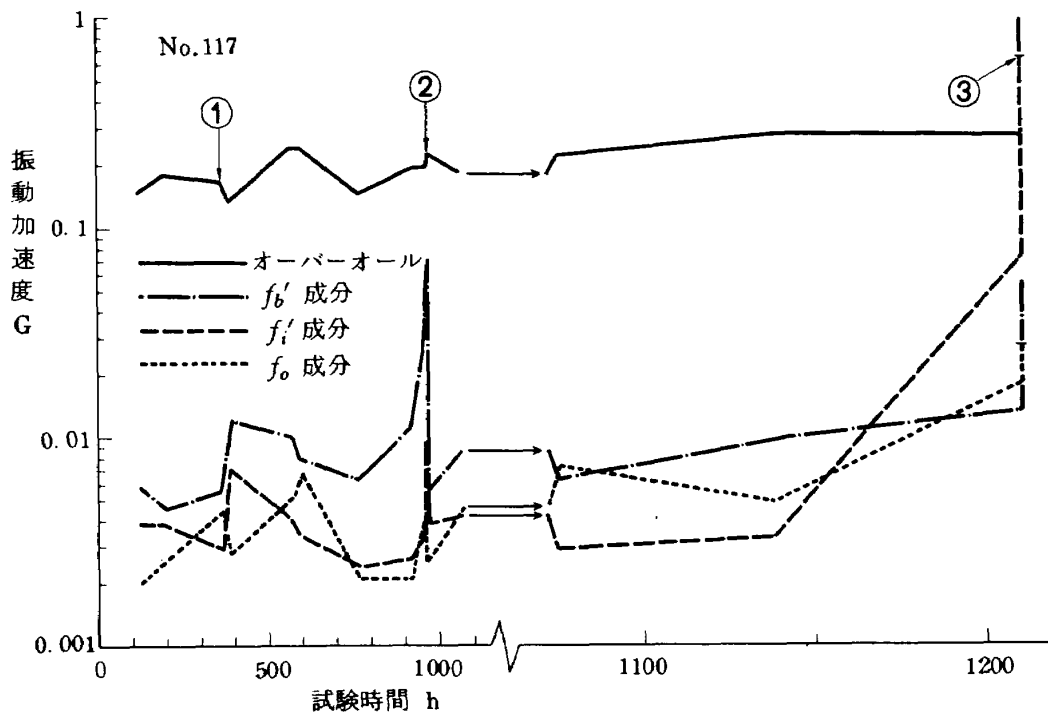


図4 試験軸受117の振動の経時変化

検波した波形をFFTで周波数分析したスペクトルを図5に示した。①は試験時間361時間で、試験軸受は正常な状態にある。振動加速度の波形は(a)に示したような、試験軸受まわりの構造の最も応答の強い固有振動数(約630Hz)の波に、こまかい不規則な波が乗っている形である。構造の固有振動数の成分の変動は小さいので、包絡線検波した波形(b)の振幅も小さい。(b)のスペクトル(c)はホワイトノイズの上に構造の最も低い固有振動数である10.6~10.8Hzのピークその他が、ところどころ突き出た形となっている。試験軸受の正常期には特性振動数 $f_b' = 5.3\text{Hz}$ 、 $f_i' = 13.3\text{Hz}$ 、 $f_o = 47.8\text{Hz}$ の成分は目立つピークにはならない。

②は試験時間965時間で、 f_b' 成分が一時的に増加したときである。振動加速度の波形は試験軸受まわりの構造の固有振動を $f_b' = 5.3\text{Hz}$ と f_b (玉の表面の1点の内輪あるいは外輪と接触する周波数62.5Hz)で振幅変調した形になっている。このような振動があらわれる原因は1個の玉の表面に欠陥が発生し、その欠陥が半径方向に作用している荷重を伝達する部分を通過するとき、内輪と外輪に順次、衝撃を与えていくためと考えられる。この波形を包絡線検波した波形は f_b' と f_b の二つの鋸歯状波が重なっ

た形となっている。また、スペクトルには f_b' 成分が最も強く、次に f_b 成分が強くあらわれている。なお、 f_b 成分は f_b' とその整数倍の周波数で振幅変調されていることが、スペクトルからも明らかである。

②の状態は長く続かず、振動はほぼ元の状態にもどったことは図4の説明で述べた通りである。

③は試験時間1210.96時間の寿命末期に、 f_i' 成分が正常時の数十倍に増加したときである。このときの波形を見ると、 $f_i' = 13.3\text{Hz}$ の周期で試験軸受まわりの構造が励振されていることがわかる。包絡線検波した波形は f_i' の鋸歯状波に高い周波数の波が重なっているが、スペクトルによれば、この波は f_i (内輪の転走面上の1点の玉と接触する周波数71.8Hz)であると判定できる。このような振動があらわれる原因は内輪の転走面に欠陥が発生し、その欠陥が荷重を伝達する部分を通過するとき、玉と接触して衝撃を与えるためと考えられる。欠陥が荷重の作用する方向と一致する位置で玉との接触が起これば、衝撃は最も強くなるが、その前後の位置での接触による衝撃は弱い。このため、図5③(a)、(b)のように大振幅の波の前後に小振幅の波が生じたものと推定される。

③の後、試験軸受の振動はさらに増加し、試験時

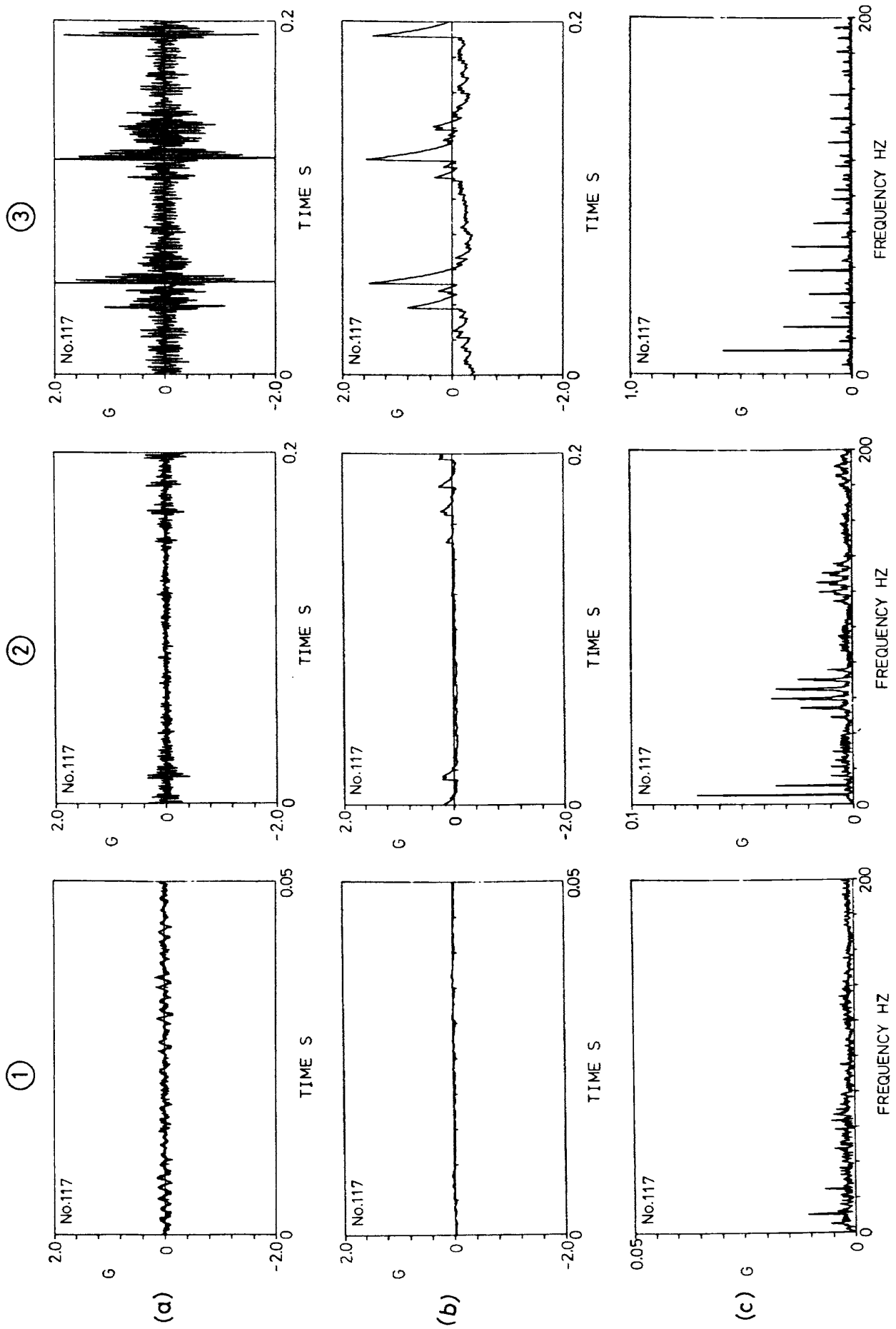


図5 試験軸受117の振動の波形とスペクトル

間 1212.4 時間で振動が制限値を越えたため、自動停止装置が作動して試験が打切られた。

試験終了後、軸受を分解して検査したところ、内輪に深さ 0.18mm、長さ 1.9mm、幅 3.3mmのはく離が生じていた。また、1個の玉に深さ 0.13mm、長さ 0.7mm、幅 0.6mmのはく離が生じていた。この破損状態は前述の推定が正しかったことを示している。

図 6 に試験軸受 123 の振動の時間的变化を示した。

試験軸受 123 は外輪に大きいはく離が発生したほか、内輪にも小さいはく離が発生したものである。

図 6 によると、寿命初期から中期は振動の変動がかなり大きく、オーバーオールも、各特性振動数成分も大幅に変化している。

図 6 に①、②、③と記した時点における振動の波形などを図 7 に、図 5 と同様に示した。

①は試験時間 508 時間で、 f_0 成分が一時的に正常時の数倍に増加したときである。このときの振動加速度の波形(a)を図 5 ①(a)に示した試験軸受 117 の正常時の波形と比較すると、振幅がやや大きいことほかに、 f_0 の周期で上下にパルス状の波が 4 箇所あらわれていることがわかる。ちなみに、このときのオーバーオールの加速度振幅は試験軸受 117 が 0.17

G、試験軸受 123 が 0.24 G であった。この波形を包絡線検波した波形(b)およびそのスペクトル(c)を図 5 ①(b)および(c)と比較すると、正常時との相異がさらに良くわかる。スペクトル(c)には $f_0 = 47.8\text{Hz}$ とその整数倍の周波数成分が強くあらわれている。ところが、この後の約 300 時間で f_0 成分は次第に減少し、その後さらに 300 時間以上、正常な状態が続いたことから、①の時点で生じた f_0 成分の増加は外輪のはく離によるものではなく、グリース中の不純物などが外輪の転走面に付着したためではないかと推定される。図 7 ①(a)と同図③(a)の外輪はく離時の波形を比較すると、外輪はく離時には f_0 の周期の衝撃が規則的に連続しているのに対し、①(a)は不規則にときどき f_0 の周期のパルスがあらわれている。

②は試験時間 1285.6 時間で、 f_i' 成分が正常時の 10 倍以上に増加したときである。このときの振動加速度の波形を見ると、 $f_i' = 13.3\text{Hz}$ の周期で衝撃が加わっていることがわかる。この波形は図 5 ③(a)に示した試験軸受 117 の寿命末期に、内輪はく離が生じたときの波形と比較すると、振幅は小さいが、良く似ている。包絡線検波した波形(b)、スペクトル(c)も同様に良く似ていることがわかる。したがって、②の時点では内輪に欠陥が発生したと推定される。

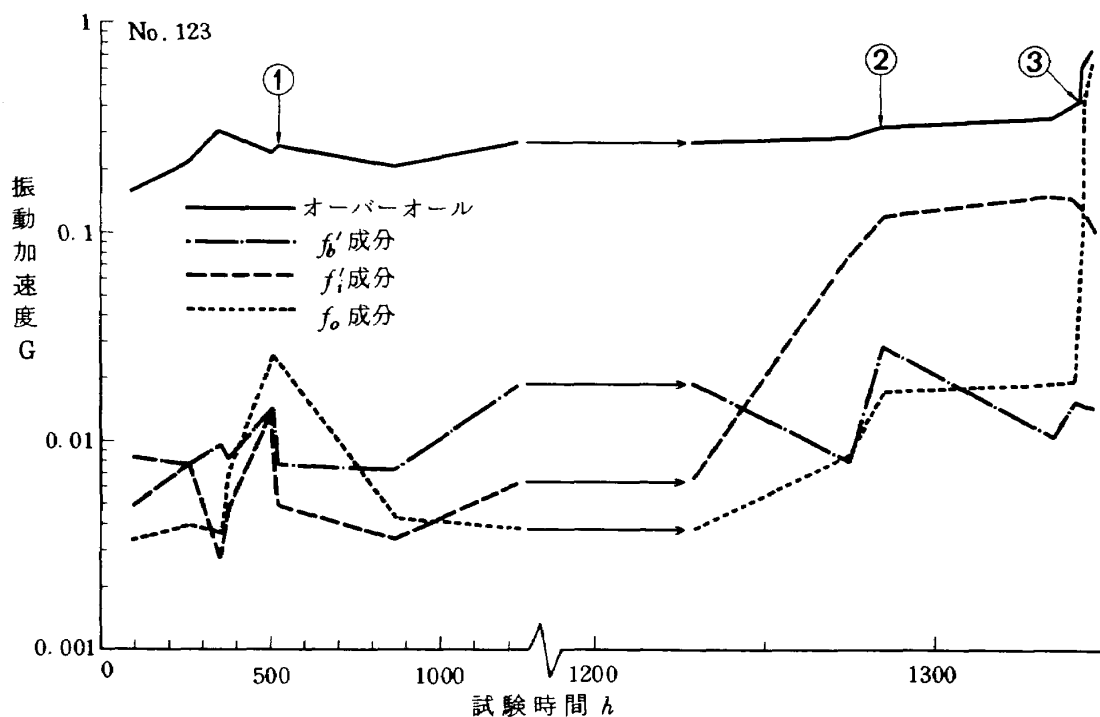


図 6 試験軸受 123 の振動の経時変化

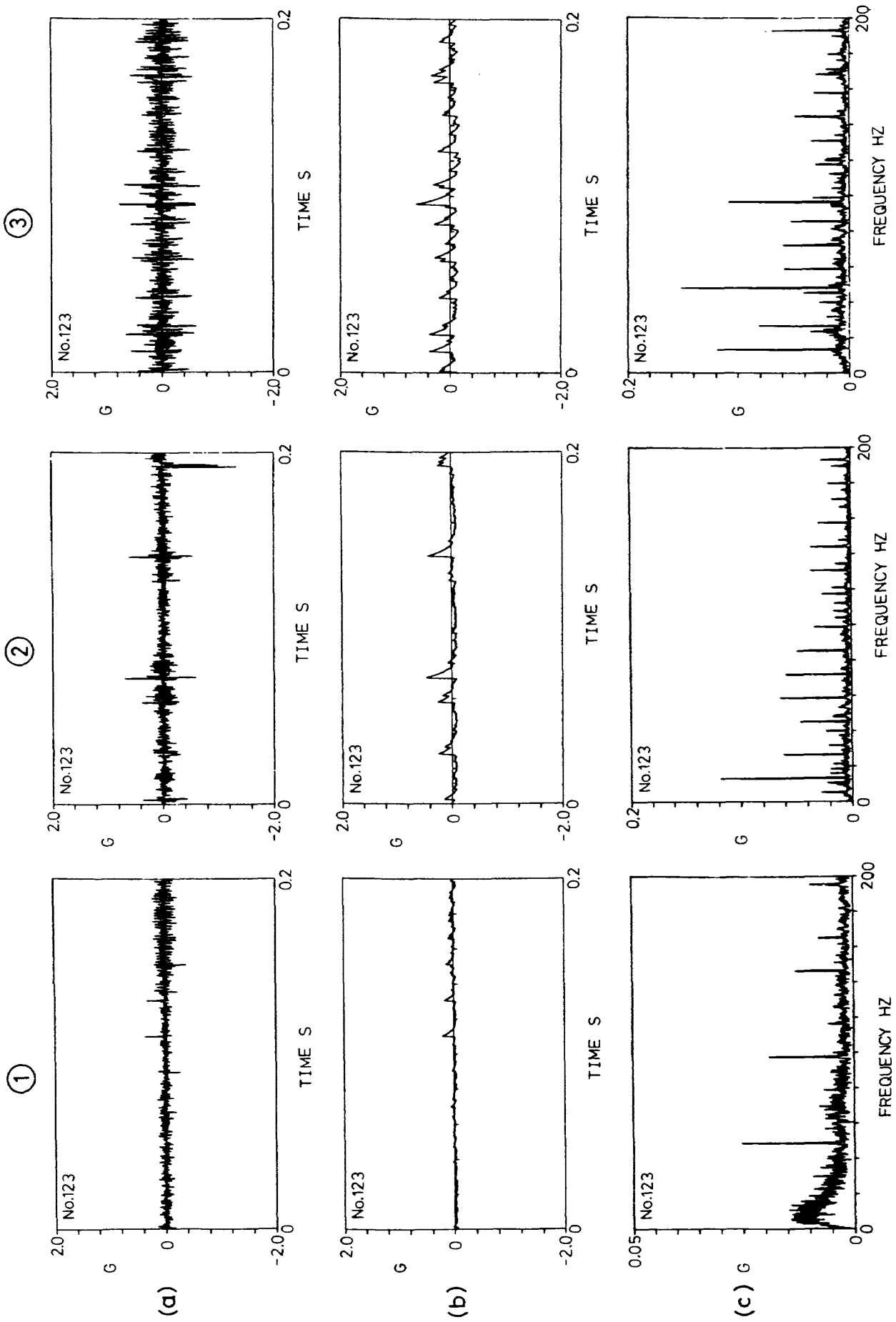


図7 試験軸受123の振動の波形とスペクトル

この時点で f_o 成分と f'_b 成分も数倍に増加しているが、外輪と玉に欠陥が生じているか否かは明らかでない。

②から約58時間後の時点③、試験時間 1343.4時間において、 f_o 成分が②の数十倍、すなわち正常時の百倍程度に増加した。このときの波形は試験軸受まわりの構造の最も応答の強い固有振動数である約 630 Hz の波を $f_o = 47.8$ Hz の鋸歯状波で振幅変調した形と見ることができる。包絡線検波した波形とそのスペクトルを見ると、 f_o 以外の $f'_i = 13.3$ Hz および $f_i = 71.8$ Hz などの成分もかなり多く含まれていることがわかる。これらの波形とスペクトルから、外輪に欠陥が発生したほか、内輪にも何らかの欠陥が発生したことが推定される。

試験時間1348時間で寿命試験を終了した後、分解し検査したところ、外輪に深さ 0.18 mm、長さ 2.9 mm、幅 3.7 mm のはく離が発生していた。また、内輪にも深さ 0.08 mm、長さおよび幅 0.7 mm の小さいはく離が発生していた。この破損状態と前述の振動の時間的变化は良く対応している。

上記の試験軸受 117 と 123 は破損が単一の要素だけでなく、117 は内輪と玉、123 は外輪と内輪のように寿命試験中に二つの要素にはく離が発生した珍しい例なので、やや詳細に述べたが、大多数の試験軸受は単一の要素のはく離で寿命を終えている。

図 8 に試験軸受 131 の振動の時間的变化を示した。試験軸受 131 は寿命がきわめて短かかった一例で、63時間で寿命を終えている。図 8 によると、オーバーオールの振動は時間とともにゆるやかに増加する傾向を示しているのに対し、 f'_b 、 f'_i および f_o 成分は、変動はしているが、時間とともに増加しているとは認められない。このような傾向はグリース潤滑の場合の他の試験軸受にも、試験期間の初期の数十時間にあらわれている。この原因は試験軸受の「なじみ」によって、試験軸受まわりの構造物の固有振動に対する減衰作用がわずかながら低下し、励振力は変化しないにもかかわらず、構造の固有振動数成分が増加するためと考えられる。

試験軸受 131 では試験時間 62.0 時間で f'_i 成分が正常時の数十倍に急増している。このとき f_o も十倍程度、 f'_b も数倍に増加している。また、オーバー

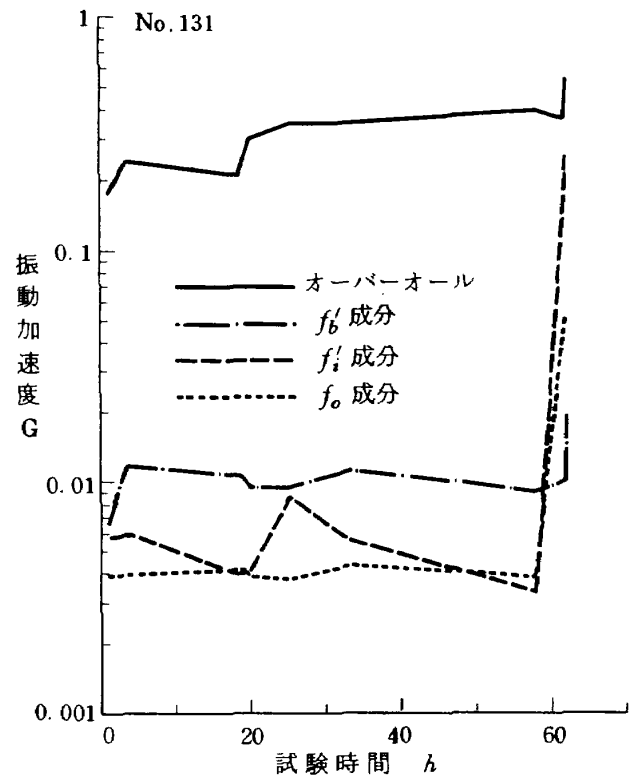


図 8 試験軸受 131 の振動の経時変化

ールの振動は 2 倍程度に増加している。試験軸受 131 の破損状態は、表 2 にも示した通り、内輪の深さ 0.19 mm、長さおよび幅 1.7 mm のはく離である。

図 9 に試験軸受 133 の振動の時間的变化を示した。試験軸受 133 では試験時間約 200 時間から f_o 成分が徐々に増加している。その後約 400 時間から増加速度が大きくなり、430 ~ 433 時間には正常時の十倍ないし百倍程度に増加している。この間、オーバーオールの振動は 2 倍ないし 4 倍に増加している。また、 f'_b 成分と f'_i 成分は数倍に増加している。試験軸受 133 の破損状態は外輪の深さ 0.03 mm、長さ 4.2 mm、幅 3.9 mm のはく離である。はく離の深さとしてはかなり浅いものである。

図 10 に試験軸受 137 の振動の時間的变化を示した。試験軸受 137 の振動は不規則に変動しており、寿命の初期から末期近くまで f'_b 、 f'_i 、 f_o 成分およびオーバーオールの振動が大幅に変動している。寿命末期の 836.7 時間から f'_b 成分の増加が顕著になり、一旦減少するが、その後また増加し、836.96 時間には正常時の十倍程度に達している。磁気テープの記録がとれていないため、図 10 には記していないが、この直後 837.0 時間に振動が急増して試験が打切ら

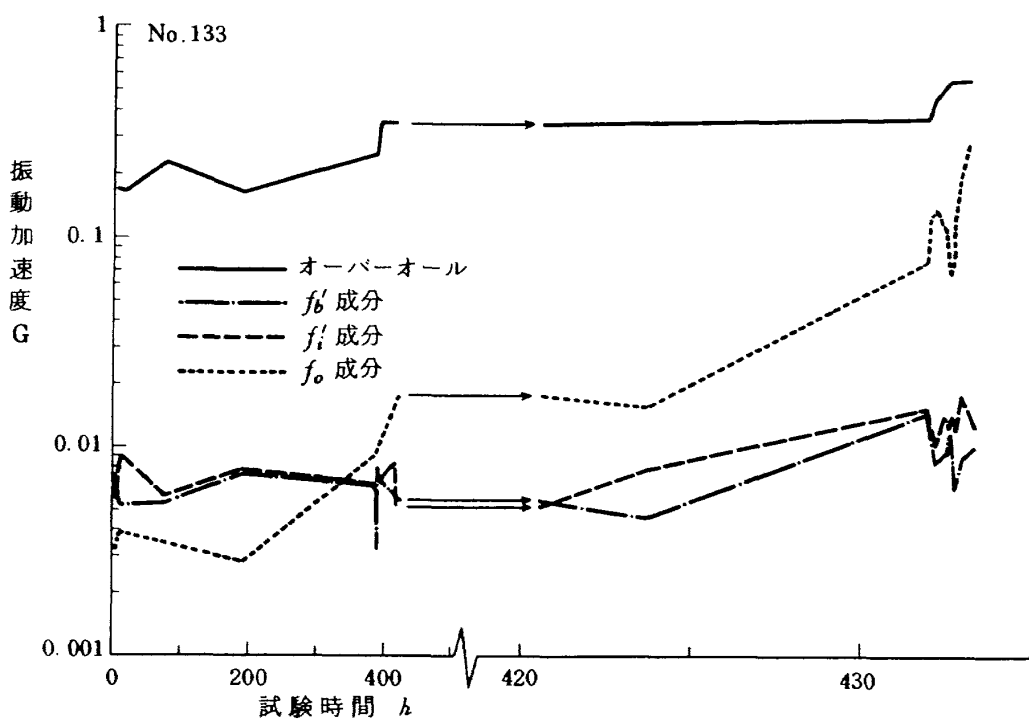


図9 試験軸受133の振動の経時変化

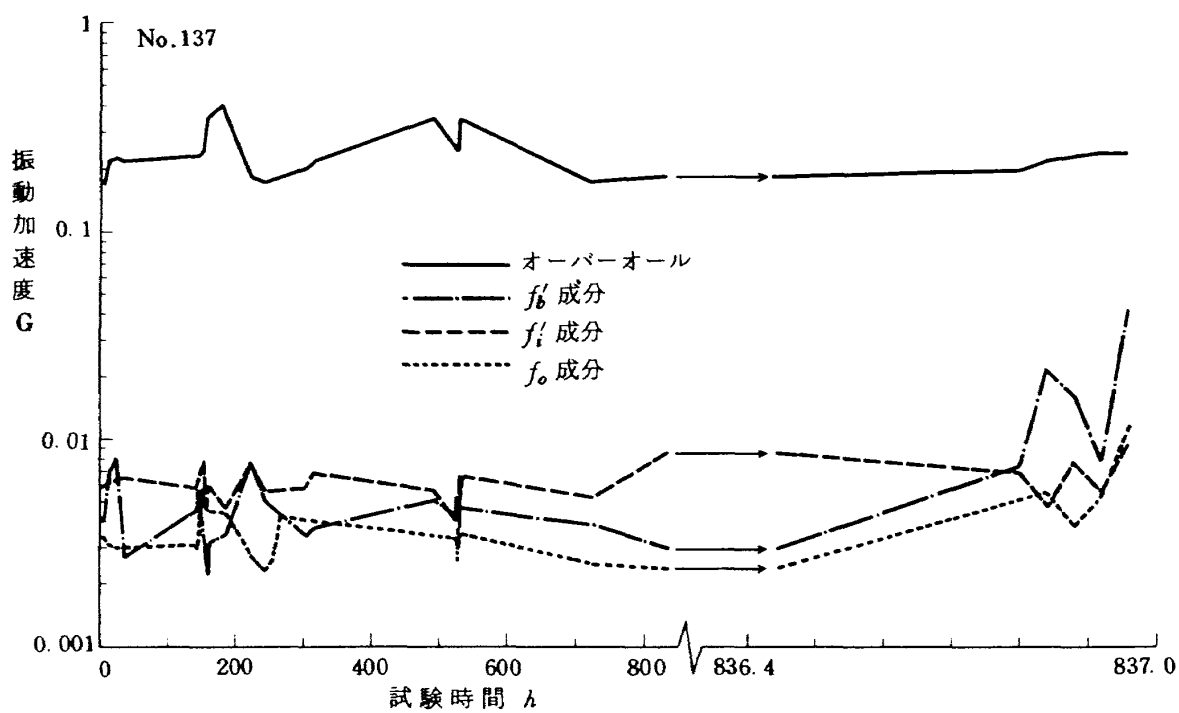


図10 試験軸受137の振動の経時変化

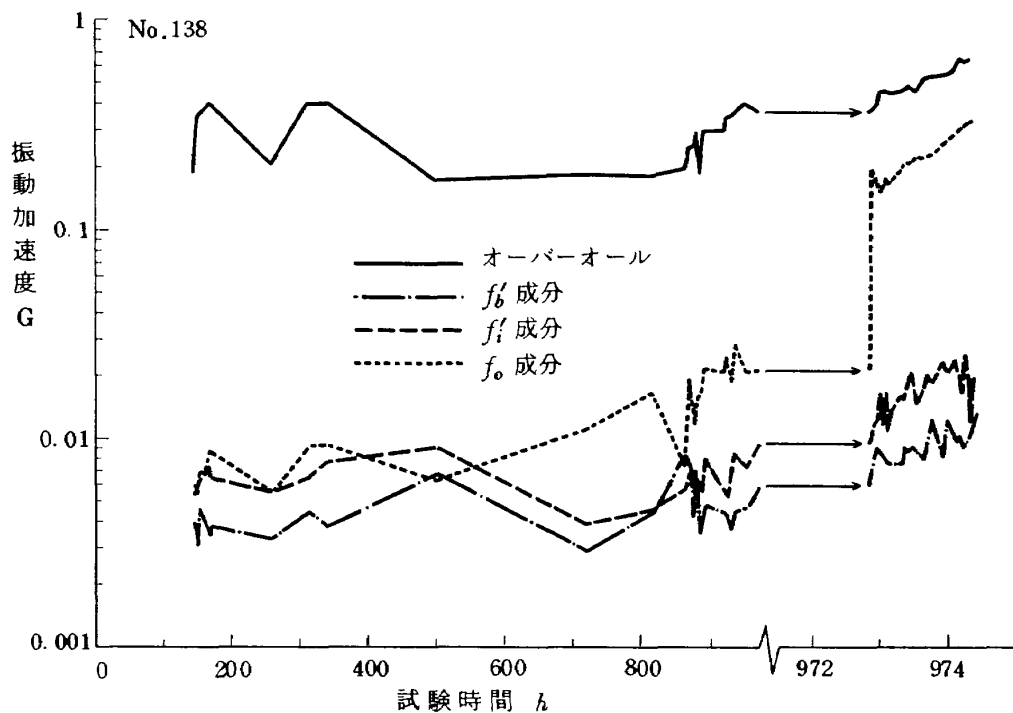


図 11 試験軸受 138 の振動の経時変化

れた。試験軸受 137 の破損状態は 1 個の玉の深さ 0.15mm, 長さ 1.6mm, 幅 1.6mm のはく離である。

図 11 に試験軸受 138 の振動の時間的变化を示した。

試験軸受 138 では寿命の中期に振動の変動が少なくなる傾向が認められるが, その前後の期間には各特性振動数成分もオーバーオールの振動も変動が大きい。

寿命末期の 883 時間くらいから f_o 成分の増加が顕著になり, 正常時の数倍まで徐々に増加した後, 972.9 時間に急増し, 正常時の数十倍となっている。このとき f_b' 成分, f_i' 成分およびオーバーオールの振動は正常時の数倍に増加している。試験軸受 138 の破損状態は外輪の深さ 0.08mm, 長さ 0.5mm, 幅 0.6mm のはく離である。

以上, 代表的な 6 個の試験軸受について寿命試験中の振動と最終的な破損の形との関係を述べた。これらを総括して, 次のことを指摘することができる。

(1) 外輪, 内輪あるいは玉にはく離が発生したときには, 振動加速度を包絡線検波した信号の f_o 成分, f_i' 成分あるいは f_b' 成分が正常時の数十倍ないし百倍程度に増加する。これに対しオーバーオールの振動は数倍程度にしか増加しない。これは第 1 報の油潤滑の場合と同様である。したがって, 各特性振動

数成分の変化を監視することは故障の早期発見に有効と考えられる。

(2) 正常時の各特性振動数成分の強度はオーバーオールの 1/100 程度であり, かなり大幅に, 不規則に変動している場合が多い。したがって, 上記(1)のような特徴があると云っても, 特性振動数成分のわずかな変化から故障を診断することは困難である。

(3) 玉にはく離などの欠陥が発生した場合には, 玉の自転軸が変化することによって, 内外輪と玉の欠陥との接触が起ったり, 起らなかったりすることがある。

このため, f_b' 成分は一時的に増加しても, 再び元の値にもどることがある。

(4) (2), (3) のような性質があるが, 特性振動数成分のいずれかが正常時の十倍以上に増加した場合には, 何らかの異常が発生したと判断することができる。

次に, 特性振動数成分の監視によって故障を発見してから, はく離などの欠陥が致命的な大きさに成長するまでの時間がどの程度あるか検討する。ところが, 転がり軸受の致命的な破損とはどの程度以上のものであるか, 必ずしも明確でないので, ここでは一応オーバーオールの振動が正常時の 3~5 倍

に増加し、自動停止装置が作動したときを規準としておく。

図4と付図117に示した試験軸受117の場合は、 f_b' 成分の一時的増加(965時間)から計れば246時間あるが、最終的な破損と結びつく f_i' 成分の増加が確認された1210.95時間から計れば1.5時間しか無い。

図6と付図123に示した試験軸受123の場合は、 f_i' 成分および f_o 成分の増加から計って73時間である。

図8と付図131に示した試験軸受131の場合は、 f_o 成分の増加から約1時間である。

図9と付図133に示した試験軸受133の場合は、 f_o 成分の増加から2.4時間である。

図10と付図137に示した試験軸受137の場合は、 f_b' 成分の増加からわずかに0.2時間である。

図11と付図138に示した試験軸受138の場合は、 f_o 成分の増加確認を893時間とすると約83時間である。

以上は代表例として挙げた6個の試験軸受であるが、その他のものも含めて、最終的な破損と結びつく特性振動数成分の増加が確認されてから、致命的な破損に至るまでの時間を表2および表3に示した。

それによると、成長時間は0.2時間から513時間までの広い範囲にわたっている。しかしながら、第1報に述べた油潤滑の場合のような、きわめて急激な増加は1例も無い。

破損の成長速度に対するグリースの種類および添加剤の影響は、本報告に示した結果からは、明確にすることができない。

なお、寿命に対するグリースの種類の影響に関しては日本学術振興会第126委員会の報告が提出されるので、それを参照されたい。

4. あとがき

転がり軸受から発生する振動を監視することによって、故障を早期発見しようとする場合の問題点を明らかにするため、第1報の油潤滑の場合に続き、グリース潤滑の場合について約3年にわたり、寿命試験中の転がり軸受の振動の記録と分析を行い、27個の試験軸受に関するデータを求めた。

しかしながら本文にも述べた通り、試験軸受が1種類であること、荷重が1種類であること、回転速度が油潤滑の場合と、グリース潤滑の場合と、それぞれ1種類であることなどのため、求められたデータは限られた範囲のものと云わざるを得ない。このように限定された条件ではあるが、第1報および本報告に示したデータの意義は、他の文献に見られるような人工的な傷によって発生させた振動でもなく、また、実際のでない苛酷な条件で故障を発生させたものでもなく、実際の使用状態に近い条件における振動の記録であることである。これによって、特性振動数成分に着目するなどの、高度な監視を行っても、前兆が確認されてから大きい破損に至るまでの時間はきわめて短い場合があることを明らかにした。

寿命試験であるため、試験条件は荷重が基本静定格荷重1050 kgfの約95%、1000 kgfとした一方、回転速度は比較的低くしている。したがって、上記のようなはく離の突発は高速だが荷重は軽い条件で使用されている転がり軸受には起こらないと考えられるが、はく離が生ずる可能性のある条件で使用されている転がり軸受では起り得るものである。

はく離が生ずる可能性のある条件で使用されている転がり軸受においては、はく離の前兆を示す振動が徐々に、単調に増加するとは限らないことが本報告のデータから明らかである。

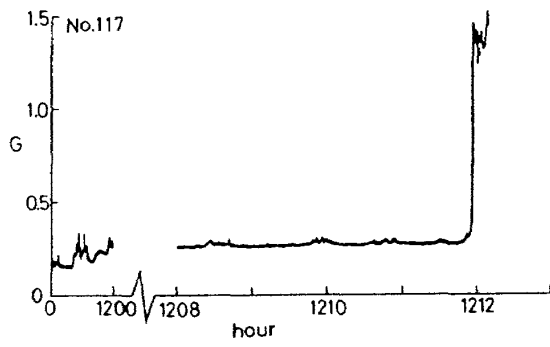
振動の監視によって転がり軸受の故障を早期発見しようとする場合はこれらのことに十分注意をはらうべきであると考えられる。

おわりに、本研究について御指導をいただいた前宇宙研究グループ第九研究グループリーダー、宮川行雄氏ならびに、はく離の大きさを測定していただいた工作課検査係長、染谷昭夫氏に深く感謝する次第である。

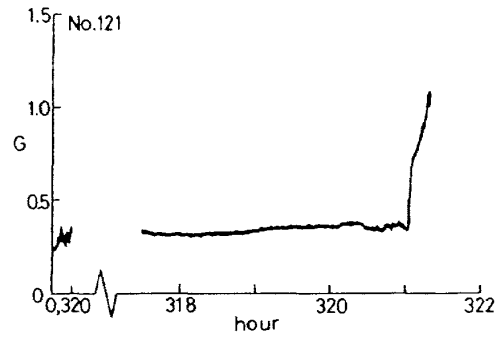
文 献

- (1) 西尾健二, 星谷昌二, 宮地敏雄; 振動の監視による転がり軸受の故障の早期発見に関する研究(第1報, 40番モータ油潤滑玉軸受) 航空宇宙技術研究所報告, TR-601, 1980年2月
- (2) Gustafsson, O.G. and Tallian, T., Detection of Damage in Assembled Rolling Element

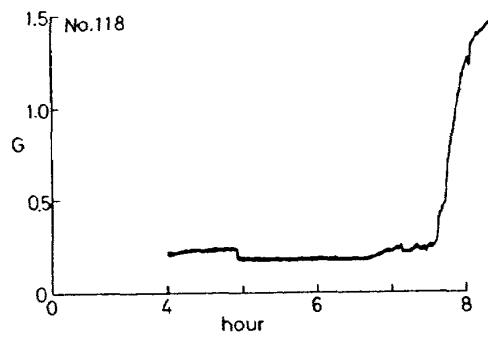
- Bearings, ASLE Transactions, Vol.5, No.1
April 1962, p.197~209
- (3) Elswood, E.L. and Gish, O.B., **Vibration Monitoring as a Tool for Turbine Engine Malfunction Detection**, Instrumentation in the Aerospace Industry, Vol.15, 1969, p.34~47
- (4) 曾田範宗, ころがり軸受寿命ところがり疲れ, 機械学会誌, 70巻576号(昭42-1), p.74~82
- (5) Dyer, D. and Stewart, R.M., **Detection of Rolling Element Bearing Damage by Statistical Vibration Analysis** J. of Mechanical Design Vol.100, April 1978, p.229~235
- (6) 染谷昭夫, 三次元座標測定器の試作, 航空宇宙技術研究所資料, TM-283, 1975年8月



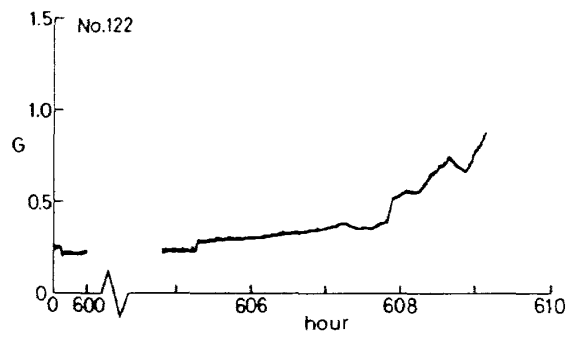
付図 117



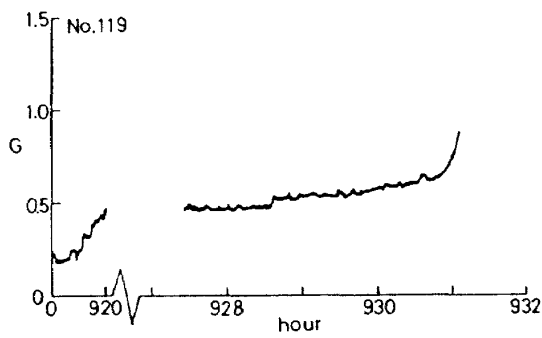
付図 121



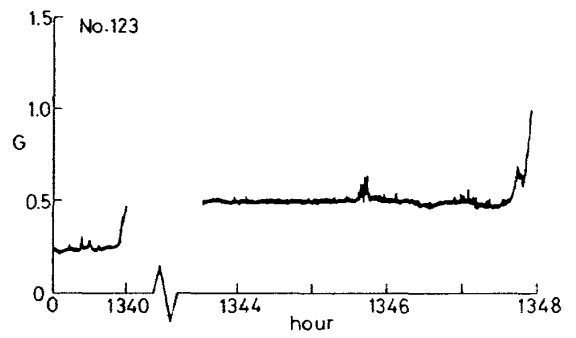
付図 118



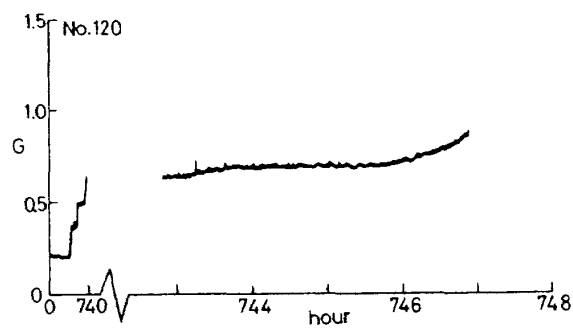
付図 122



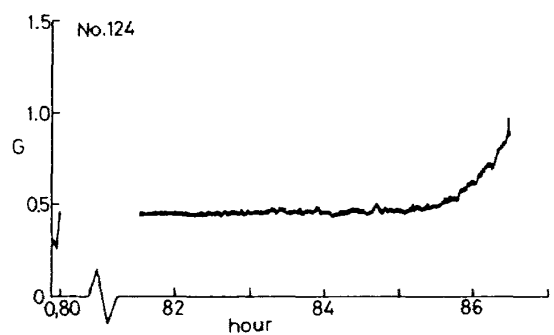
付図 119



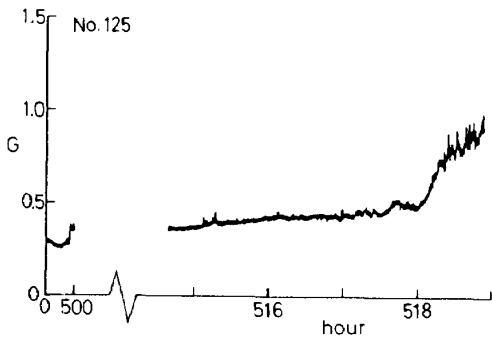
付図 123



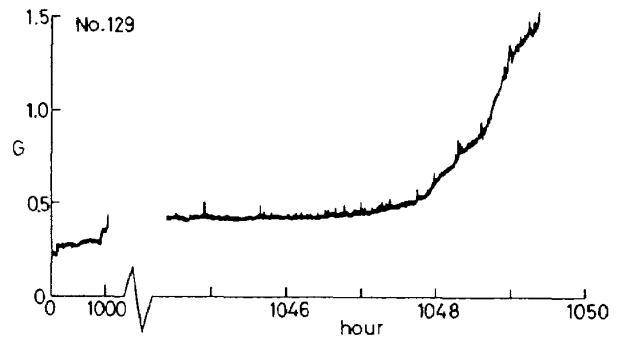
付図 120



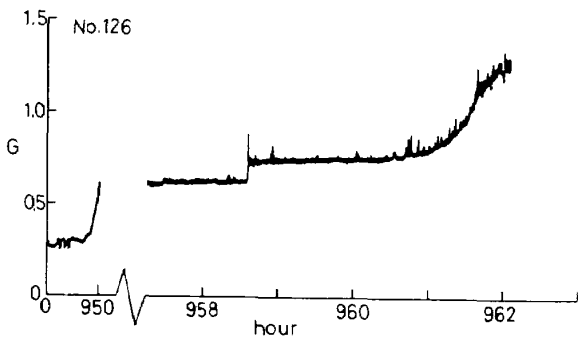
付図 124



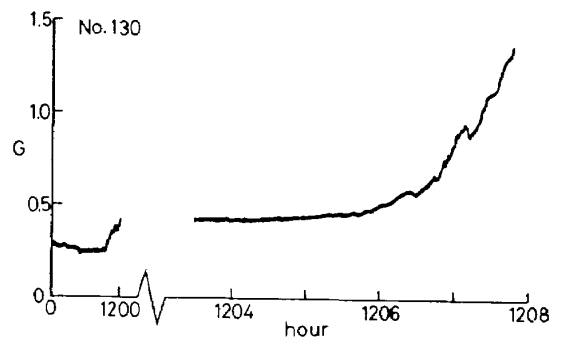
付図 125



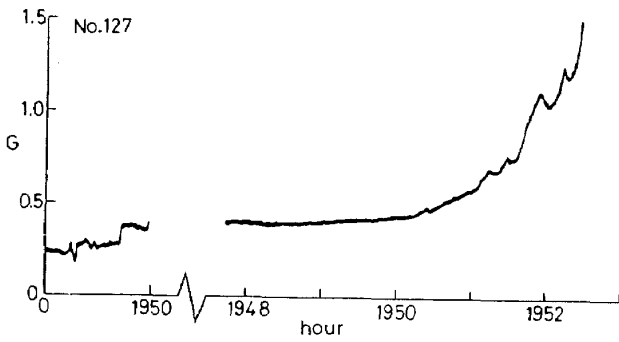
付図 129



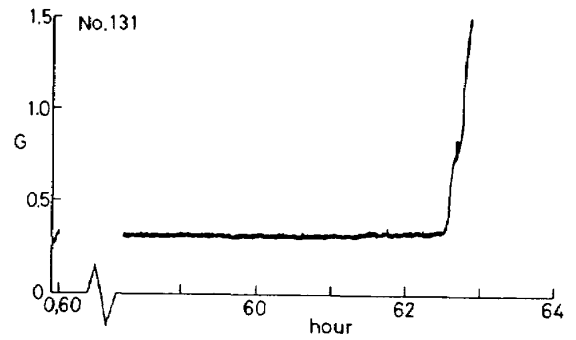
付図 126



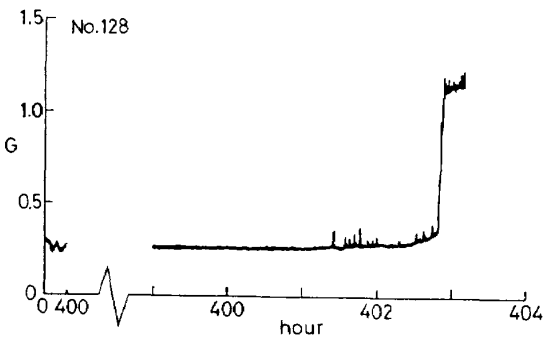
付図 130



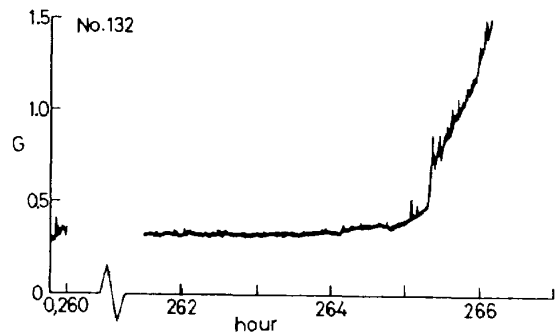
付図 127



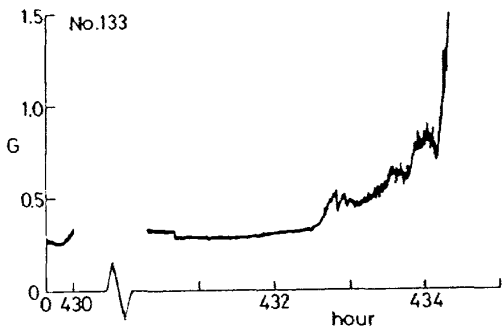
付図 131



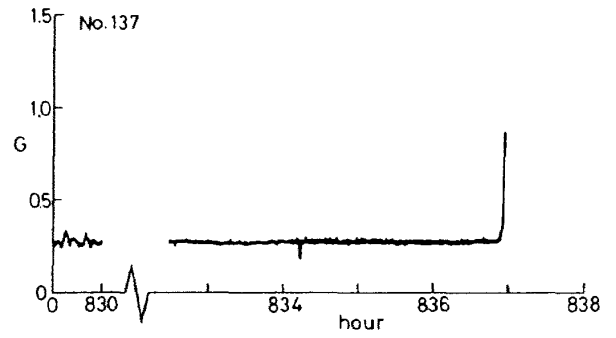
付図 128



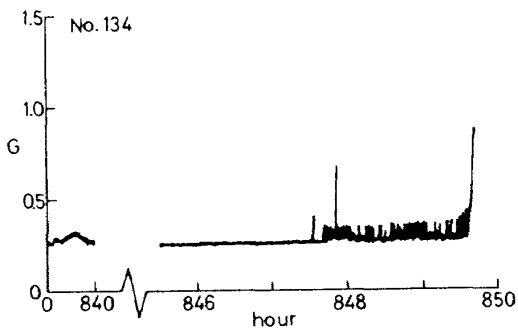
付図 132



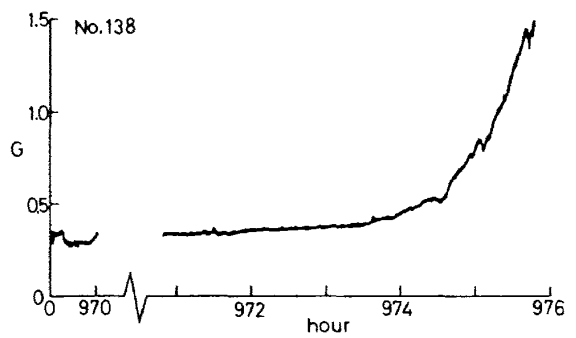
付図 133



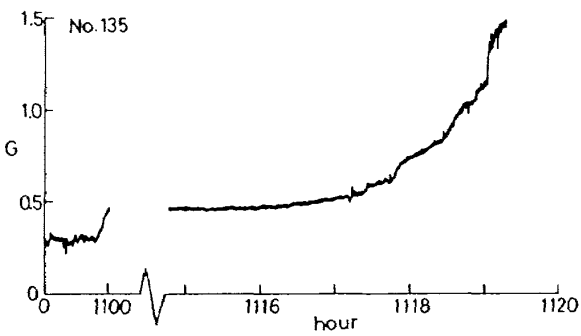
付図 137



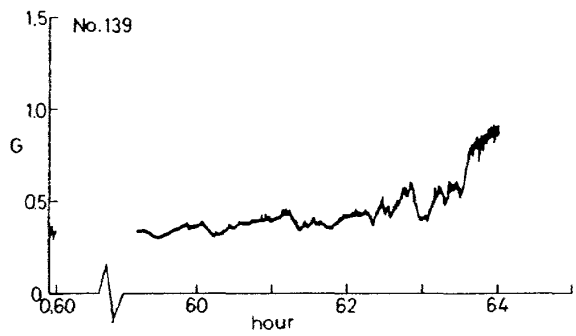
付図 134



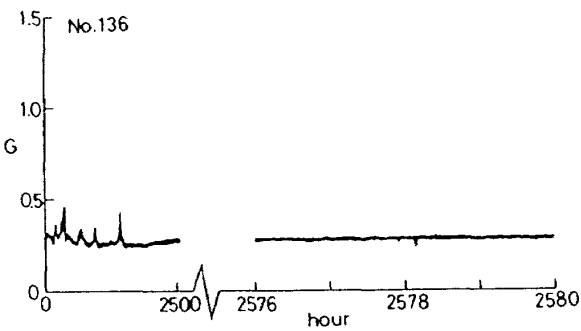
付図 138



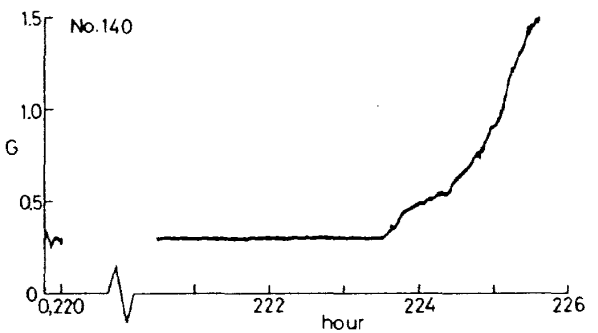
付図 135



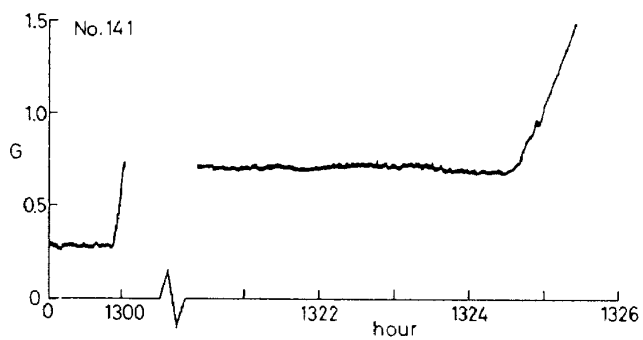
付図 139



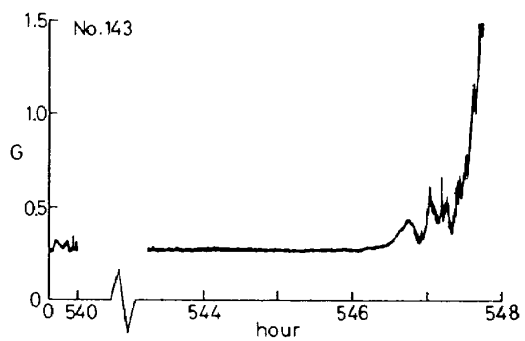
付図 136



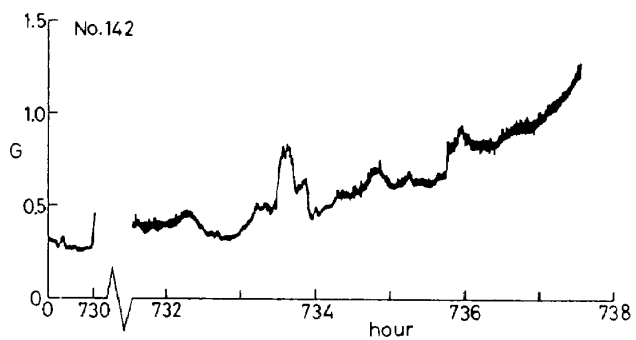
付図 140



付図 141



付図 143



付図 142

航空宇宙技術研究所報告675号

昭和56年7月発行

発行所 航空宇宙技術研究所
東京都調布市深大寺町1880
電話武蔵野三鷹(0422)47-5911(大代表) ㊦182
印刷所 株式会社 共 進
東京都杉並区久我山5-6-17
